

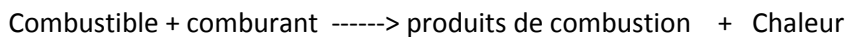
TP Combustion expérimental

A. Introduction

Cette séance de travaux pratiques va permettre d'appréhender le fonctionnement d'une chambre de combustion destinée par exemple à du chauffage domestique. L'objectif de la séance est double : comprendre quelles sont les étapes d'un processus de combustion, écrire un bilan d'énergie et décrire quelles sont les dégradations observées.

1. Généralités sur la combustion

La combustion est aujourd'hui un des principaux moyens de conversion de l'énergie. Elle est utilisée dans des nombreux systèmes pratiques aussi bien pour produire de la chaleur (chaudières ou fours domestiques et industriels), de l'électricité (centrales thermiques), que pour le transport (moteurs automobiles et aéronautiques, moteurs fusée, . . .) ou encore la destruction de déchets (incinérateurs). La combustion peut être caractérisée comme une (ou des) réaction(s) irréversible(s) fortement exothermique(s) entre un combustible et un comburant (ou oxydant) selon le schéma global :



Les combustibles les plus divers, qu'ils soient sous forme gazeuse, liquide ou solide peuvent être utilisés. Parmi les plus courants, citons le bois, le charbon, les hydrocarbures (méthane CH₄, propane C₃H₈, essence, gasoil, kérosène, fioul, . . .), l'hydrogène (H₂), . . . Le comburant est le plus souvent l'oxygène de l'air, plus exceptionnellement de l'oxygène pur (moteur-fusée, certains fours industriels) qui permet d'atteindre des températures plus élevées mais pose des problèmes de sécurité. Plus rarement, d'autres comburants sont utilisés (moteurs fusée pyrotechniques). La combustion met en jeu plusieurs phénomènes et ce TP doit faire ressortir les caractéristiques majeures du processus de combustion mais aussi les problèmes que cela entraîne et les préoccupations suscitées par la conceptions de systèmes de conversion d'énergie.

Type de carburant	Masse volumique à 15 °C (kg · L ⁻¹)	Intervalle de distillation (1)		Nombre d'atomes de carbone des constituants	Rapport atomique N _H /N _C (2)	Composition (en volume)			
		Température initiale (°C)	Température finale (°C)			Paraffines (%)	Naphtènes (%)	Oléfines (%)	Aromatiques (%)
Gaz naturel (GNV) stocké à l'état gazeux sous 200 bar	0,187			1 et 2	3,5 à 3,9	100	0	0	0
GPL-carburant	0,510 à 0,580	< 0	0	3 et 4	2,0 à 2,67	60 à 100	0	0 à 40	0
Supercarburant et essence ordinaire	0,720 à 0,770	30 à 35	180 à 200	4 à 10	1,7 à 1,9	40 à 65	0 à 5	0 à 20	15 à 45
Carburacteur	0,770 à 0,830	140 à 150	250 à 280	9 à 13	1,9 à 2,1	50 à 65	20 à 30	0	10 à 20
Gazole	0,820 à 0,860	160 à 180	340 à 370	10 à 20	1,9 à 2,1	50 à 65	20 à 30	0	10 à 30
Carburants lourds	0,95 à 1,05	180 à 200	450 (3)	> 13	0,8 à 1,7 (4)	(5)	(5)	0	55 à 100 (4)

GPL : gaz de pétrole liquéfié.
 (1) À pression atmosphérique.
 (2) Rapport du nombre d'atomes d'hydrogène au nombre d'atomes de carbone.
 (3) Température correspondant à 20 à 30 % en volume distillé. La fraction la plus importante (70 à 80 % en volume) ne distille pas à pression atmosphérique.
 (4) Estimations relatives au résidu de distillation atmosphérique.
 (5) Valeur inconnue.

Tableau 1 : Caractéristiques générale et composition globale des différents types de carburant

Puisque la combustion est avant tout une réaction (ou des réactions) entre combustible et comburant, elle va faire intervenir un aspect chimique. Il faudra donc décrire les réactions chimiques et déterminer dans quelles conditions elles interviennent (initiation, allumage, extinction, . . .). Ces réactions chimiques produisent de la chaleur qui induit des fortes températures au voisinage de la flamme. Les gradients thermiques ainsi créés vont donner lieu à des transferts de chaleur au sein du milieu, par convection, conduction ou même par rayonnement. Dans un système pratique, ces transferts de chaleur devront être domestiqués pour récupérer la chaleur issue de la réaction, soit directement comme source de chauffage, soit pour la convertir en énergie mécanique (actionnement d'une turbine, par exemple). Enfin, dans la plupart des cas, la combustion se déroule en milieu gazeux, ce qui entraîne deux aspects supplémentaires : les transferts de masse interviennent dans le transport des réactifs l'un vers l'autre, que ce soit par convection, diffusion moléculaire ou mélange turbulent. Pour maintenir un fonctionnement permanent du système considéré, il faut non seulement apporter des réactifs frais mais aussi évacuer les produits de combustion, ce qui entraîne un aspect mécanique des fluides.

Tableau 9 – Valeurs typiques de PCI massique et volumique des carburants liquides et gazeux			
Produit	PCI _m (MJ · kg ⁻¹)	Masse volumique à 15 °C (kg · L ⁻¹)	PCI _v à 15 °C (MJ · L ⁻¹)
GPL	46,0	0,550	25,3
Essence	42,7	0,755	32,2
Carburacteur	43,5	0,785	34,1
Gazole	42,6	0,840	35,8
GNV (H) (1)	45,4	0,187 (2)	8,5
GNV (B) (1)	40,3	0,190 (2)	7,7
GNL (H)	45,3	0,415 (3)	18,8
GNL (B)	40,3	0,415 (3)	16,7
Fuel lourd	41,4	0,950	39,3

(1) Les lettres H (haut) et B (bas) sont liées à la présence en quantités plus ou moins importantes de diluants (CO₂, N₂) dans les gaz naturels de différentes origines. Par exemple, le gaz de Groningue (Pays-Bas) contient 14,3 % d'azote, alors que celui d'Ekofisk (Norvège) n'en contient que 0,3 %.

(2) Stockage à l'état gazeux sous une pression de 200 bar.

(3) Stockage à l'état liquide à une température de - 164 °C.

Figure 1: Propriétés principales des combustibles

2. Conversion d'énergie et pollutions

Depuis quelques années, la réduction des émissions polluantes, sous la pression des opinions publiques et des préoccupations scientifiques concernant l'effet de serre et la destruction de la couche d'ozone, tend à devenir un enjeu majeur.

Citons en quelques aspects qui induisent des recherches et des développement en combustion:

- Il existe aujourd'hui des normes qui fixent un niveau de pollution maximal admissible pour les avions qui décollent des aéroports de certains pays du nord de l'Europe. Si les amendes en cas d'infraction ne sont pas encore vraiment dissuasives, elles le deviendront probablement dans un avenir proche. . .

- Certains états des Etats-Unis (Californie, notamment) ont prévu des normes antipollution de plus en plus draconiennes pour les véhicules automobiles. A l'heure actuelle, personne ne sait encore réaliser des moteurs automobiles susceptibles de satisfaire les normes qui seront d'appliquer dans les années 2012 - 2020. Seuls les constructeurs qui satisferont ces normes ont des chances de survie.

Différentes techniques avec leur appareillage spécifique permettent d'analyser la combustion des espèces hydrocarbonées : les réacteurs (fermés, à écoulement tubulaire, parfaitement agités), les systèmes à compression (machine à compression rapide, tube à choc) et les brûleurs (à flamme de prémélange, à flamme de diffusion). À partir de ces dispositifs expérimentaux, des mesures de constantes cinétiques peuvent être effectuées ; elles déterminent la vitesse à laquelle se déroule une réaction. Ces résultats servent de base à l'élaboration d'un mécanisme cinétique qui regroupe toutes les voies réactionnelles ayant lieu pendant la combustion. *Ces modèles permettent de simuler la combustion d'un hydrocarbure dans un réacteur donné, avec des conditions de température et de pression définies.*

Il est important de connaître les différents processus de formation des polluants afin de les enrayer et de réduire leur production.

AIR	+	Carburant	=	GAZ de combustion
Oxygène (O ₂)		Oxygène (O ₂)		Excès d'O ₂
		Hydrogène (H ₂)		dioxyde de Carbone (CO ₂)
Azote (N ₂)				Azote (N ₂)
		Carbone (C)		
		Soufre (S)		
		Azote (N ₂)		
Vapeur d'eau		Eau (H ₂ O)		Suie (C)
				monoxyde de Carbone (CO)
				dioxyde de Soufre (SO ₂)
				oxydes d'Azote (NO _x)
				Vapeur d'eau

Le Figure 2: Schéma d'un processus de combustion en terme d'espèces majoritaires

Les différents éléments qui composent les gaz de combustion sont indiqués ci-dessous dans l'ordre de leurs concentrations nominales.

a) Azote (N₂)

L'azote est un gaz sans couleur, inodore et insipide et il ne prend pas partie dans le processus de combustion. C'est le composant principal de l'air (79 %) et il réduit l'efficacité du processus de combustion puisqu'il est chauffé et soufflé dans le conduit sans fonction réelle pour le processus.

Concentration typique dans les gaz de combustion : approximativement 78 à 80 %

b) Dioxyde de carbone (CO₂)

Le dioxyde de carbone ou gaz carbonique est aussi un gaz sans couleur et inodore on le trouve dans le souffle humain aussi bien que dans tous processus de combustion. Le niveau maximum de dioxyde de carbone autorisé dans des espaces de travail en Europe est de 5000 ppm (niveau moyen actuellement du au GES, 380ppm). Un niveau de dioxyde de carbone de 10 000 ppm réduira la capacité intellectuelle de concentration de 30 %. Les concentrations de plus de 15 % (150000 ppm) causent l'inconscience immédiate. Le CO₂ est le gaz responsable de l'effet de serre. Les accords de Kyoto imposent une diminution régulière des émissions de CO₂. Tous les combustibles fossiles génèrent du CO₂ toutefois certains combustibles en produisent moins à puissance égale. Ainsi le gaz naturel génère 30% moins de CO₂ que le fioul. On s'oriente donc vers une amélioration conséquente des rendements (modernisation du parc de chaudières : chaudières à condensation, réglage des brûleurs) en attendant des solutions de remplacement des énergies carbonées (hydrogènes, pile à combustible. ;).

La concentration typique dans les gaz de combustion :

- Brûleurs gaz : 10 - 12 %
- Brûleurs fioul : 12 - 14 %

c) Oxygène (O₂)

C'est, bien entendu le plus important car la combustion ne pourrait pas avoir lieu sans oxygène. L'oxygène contenu dans l'air réagit en partie avec l'hydrogène (H₂) contenu dans le carburant et forme de l'eau (H₂O). Cette eau sous forme vaporisée, en fonction de la température des gaz de combustion, se condense dans le pot de condensats de l'analyseur de combustion ou reste dans les gaz de combustion. Le reste de l'oxygène consommé réagit avec le carbone contenu dans le carburant pour former du dioxyde de carbone et, malheureusement aussi, un peu de monoxyde de carbone. Ceux-ci s'échappent sous forme de des gaz chauffés par le conduit.

La concentration typique dans les gaz de combustion :

- Brûleurs gaz : 2-3 %
- Brûleurs fioul : 2 - 6 %

d) Monoxyde de Carbone (CO)

C'est un gaz fortement toxique qui est très dangereux car il est sans couleur et inodore. La concentration maximum autorisée dans des lieux de travail est de 50 ppm pendant 8 heures.

Concentration typique dans les gaz de combustion :

- Brûleurs gaz : 10 - 110 ppm
- Brûleurs fioul : 10 - 160 ppm

e) Oxydes d'azote (NO_x)

Les oxydes d'azote sont présents dans tous les processus de combustion où des carburants fossiles sont brûlés. Ils proviennent en partie par l'oxydation de l'azote contenu dans l'air, aussi bien que de l'azote organique contenu le carburant. (Le processus nécessite de hautes températures, donc la possibilité de réduire la concentration de NO_x consiste à essayer de maintenir la température du brûleur et la température des surfaces métalliques à l'intérieur de la chambre de combustion aussi basses que possible.)

L'oxyde nitrique produit s'oxyde dans le temps et se transforme en dioxyde d'azote (NO₂).

Le dioxyde d'azote est un gaz brun, toxique, hydrosoluble qui peut sérieusement endommager les poumons s'il est inhalé, il est aussi à la source des pluies acides. Sous l'action des rayonnements solaires Ultra Violet il aide à former de l'ozone.

La concentration typique dans les gaz de combustion :

- Brûleurs gaz : 50 - 70 ppm
- Brûleurs fioul : 50 - 110 ppm

f) Dioxyde de soufre (SO₂)

La quantité de SO₂ dépend du type et de la qualité du carburant employé (la plupart des fiouls sont désormais désoufrés). C'est un gaz toxique qui contribue à la formation des pluies acides. La concentration maximale autorisée dans les lieux de travail est de 5 ppm. Combiné avec de l'eau, il forme de l'acide sulfureux (H₂SO₃) et de l'acide sulfurique (H₂SO₄).

La concentration typique dans les gaz de combustion :

- Brûleurs fioul : 180 - 250 ppm
- Quand du charbon de mauvaise qualité est utilisé, la concentration en SO₂ peut parfois excéder 2000 ppm.

g) Hydrocarbures (C_xH_y)

Les combustibles comme le méthane (CH₄) ou le butane (C₄H₁₀) sont présents lors d'une combustion incomplète (manque d'oxygène). Ceux-ci font partie d'une famille chimique

techniquement connue comme les alcanes. Ils peuvent avoir une action néfaste car il constitue des GES avec un fort Potentiel de réchauffement global (PRG , $PRG_{H_2O}=8$; $PRG_{CH_4}=23$; $PRG_{N_2O}=296$)

La concentration typique dans les gaz de combustion : < 60 ppm

h) Suie

Page |
5

La suie est un autre signe que la combustion est incomplète. L'opacité est mesuré par comparaison avec une l'échelle de Bacharach (0 - 9). La suie dans les gaz de combustion causera des accumulations sur les parties internes du brûleur et diminuera le rendement des échangeurs au cours du temps.

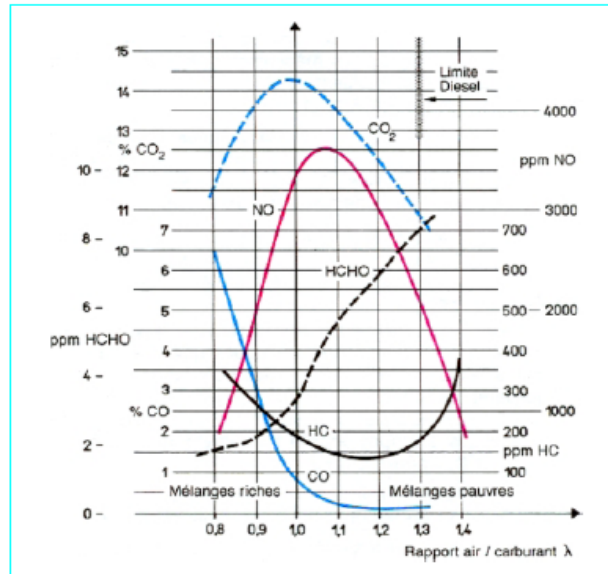


Figure 3: Evolution de la concentration molaire des espèces majoritaires en fonction de la richesse

B. Présentation de l'installation



Figure 4: Chambre de combustion (chaudière) avec le bruleur liquide et le bruleur gazeux

Cette installation est prévue pour fonctionner avec différents combustibles gazeux (gaz naturel, gaz de charbon, GPL, biocarburant...) et différents combustibles liquides (kérosène, fuel domestique...). Pour nos manipulations, nous nous en tiendrons au butane et au gasoil. Ces deux combustibles étant d'origine fossile leurs caractéristiques peuvent varier sensiblement selon les approvisionnements. On utilisera des caractéristiques moyennes ci-dessous :

Fuel	Stoichiometric A/F by volume	Stoichiometric A/F by mass	Theoretical maximum CO2 (%)	Gross Calorific value (MJ/kg)	Chemical Formula
Natural Gas	9.52:1	17.16:1	9.50	55.00	CH4
Propane	23.8:1	15.6:1	11.62	50	C3H8
Butane	30.94:1	15.38:1	11.96	49.5	C4H10
Gasoil	73.42	14.28	13.86	45.5	C _{10.82} H _{18.42}

Tableau 2 :Caractéristiques des combustibles utilisés

1. La chambre de combustion

Une chambre de combustion cylindrique, en acier inoxydable est montée horizontalement et est placée dans le prolongement du brûleur par l'intermédiaire d'un ouvrage réfractaire. Cette chambre, munie de hublots d'observation visuelle de la flamme, comporte une double enveloppe dans laquelle circule de l'eau de refroidissement. Cette eau de refroidissement simule le circuit d'eau chaude rencontré dans le cadre des systèmes de type chaudière.

Cette eau refroidi ensuite le fond de la chambre puis est évacuée dans un circuit annexe d'eau de refroidissement. Deux indicateurs renseignent sur la température de l'eau de refroidissement, à l'entrée et à la sortie. Une vanne, placée en amont d'un débitmètre (débit exprimé en g/s), permet d'en modifier le débit. Un robinet de vidange est prévu sur la partie inférieure pour l'évacuation des condensats éventuels. Un circuit de prélèvement d'eau ne rentrant pas en compte dans le bilan thermique sert au refroidissement des hublots.

2. Le comburant

L'air est admis dans l'enceinte où s'effectue le mélange, par le biais d'un ventilateur couplé à un régulateur de pression. Le débit d'air n'est pas mesuré directement mais est calculé grâce à une analyse de gaz qui fournit le dosage réel du mélange.

On peut faire varier avec précision les débits d'air par la modification de la vis de réglage (voir figure suivante) qui commande l'inclinaison d'un volet en sortie de ventilateur.

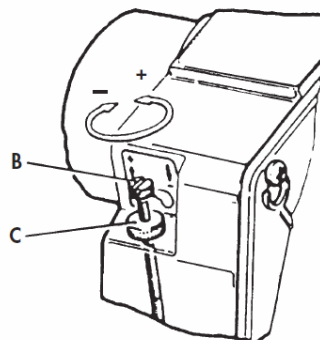


Figure 5: Vis de réglage du débit d'air

3. Les carburants et brûleurs

a) Les carburants les plus utilisés

Les brûleurs au gaz naturel

Il combine deux avantages importants:

- L'approvisionnement par le réseau facilite les aspects logistiques et garantit un approvisionnement continu sans risque d'interruption.
- Le gaz naturel est mis en avant comme étant un gaz propre générant peu de dioxyde de carbone et pratiquement aucun autre polluant.

Le gaz naturel est principalement constitué de méthane (CH_4) et donc de beaucoup plus d'atomes d'hydrogène que de carbone (rapport 4). Pour cette raison le taux de dioxyde de carbone (CO_2) par rapport à l'eau produite sous forme vapeur (H_2O) est moindre que celui des autres carburants. Il y a donc moins de dioxyde de carbone produit par unité calorifique que pour les autres carburants.

La température élevée nécessaire pour brûler le gaz naturel sans avoir un taux trop important de monoxyde de carbone a malheureusement un effet pervers. En effet, elle augmente la production de NOX à partir de l'azote contenue dans l'air. C'est devenu un critère important pour ce genre de brûleurs. Les fumées analysées donneront en général une valeur d'environ 10ppm de CO couplée avec une valeur de NOX supérieure à 100ppm.

Les autres polluants seront à des niveaux très bas dans la plupart des cas dans la mesure où les gaz sont nettoyés de leurs impuretés avant d'être distribués. La mesure d'opacité n'est généralement pas nécessaire. Pour les chaudières à condensation, le réglage de l'excès d'air est indispensable afin de s'assurer du phénomène de condensation (trop d'excès d'air empêche la condensation).

Les brûleurs fioul

Les brûleurs fioul peuvent utiliser plusieurs types de fiouls : du fioul domestique (diesel rouge) jusqu'au fioul lourd qui nécessite un préchauffage avant de pouvoir être brûlé.

En général, plus le fioul est léger, plus la combustion est propre. Ce n'est pas uniquement une question de CO et de suie mais aussi d'autres polluants présents comme le dioxyde de soufre. Les composés soufrés et azotés sont plus abondants dans les fiouls lourds, ce qui implique des taux de SO_2 et NO plus élevés.

Les niveaux de condensation seront généralement inférieurs avec les brûleurs fioul qu'avec les brûleurs gaz réduisant ainsi la quantité d'eau dans le pot de condensats. Toutefois le problème de la solubilité des gaz doit, cette fois, être considéré. En effet, SO_2 et NO sont hautement solubles dans l'eau et il faut éliminer celle-ci régulièrement pour obtenir une mesure précise.

b) Les brûleurs bas-NOX

Les brûleurs bas-NOX font appel principalement à trois types de procédés :

- La recirculation des gaz de combustion: Elle réduit la concentration en oxygène et la température de la flamme. Très efficace avec les combustibles gazeux. On distingue la recirculation externe et la recirculation interne. La première a pour inconvénient d'appeler une consommation d'électricité supplémentaire : celle des ventilateurs. La seconde, dans laquelle la recirculation est induite par les brûleurs eux-mêmes, supprime ces inconvénients.

- L'étagement de l'air : On crée une première zone de combustion en défaut d'air et on apporte l'excès d'air nécessaire en aval. Cette méthode peut s'appliquer au niveau de la chaudière, si la taille du foyer le permet, ou directement au niveau du brûleur, avec un risque de formation de CO si les entrées d'air secondaire sont mal situées.

- L'étagement du combustible : A l'inverse de la méthode précédente, on crée une première zone de combustion à fort excès d'air, donc à basse température, suivie d'une zone secondaire riche en combustible où les radicaux hydrocarbonés réduisent le NO formé en N₂. Cette méthode est très utilisée avec les combustibles gazeux. Le « reburning » suit le même principe, appliqué à la chaudière.

Les brûleurs bas-NOX de première génération utilisaient tous l'une de ces trois solutions. La seconde génération combine généralement trois d'entre elles, et permet d'atteindre des taux de réduction des NOX de 40 à 60%, la limite étant fixée par l'apparition de CO.

Un type de brûleur bas NOX plus récent est le brûleur radiant à 'pré-mélange' : le mélange air-combustible s'écoule à travers un matériau poreux et passe dans la chambre de combustion à une vitesse inférieure à la vitesse de flamme. Le front de flamme se stabilise à l'intérieur de ce matériau poreux et la température de la flamme est limitée, du fait qu'une partie de l'énergie se dégage par rayonnement de la surface du brûleur. On parvient ainsi à réduire de 90% la formation des NOX. Cependant, la résistance du matériau poreux limite la charge surfacique admissible et ce type de brûleur est plutôt réservé aux installations de faible puissance.

Une autre solution faisant appel à un brûleur à pré mélange est celle de la combustion catalytique. Son gros avantage est de permettre une combustion stable de mélanges très pauvres en combustible sans rejet d'imbrûlés. Elle allie un faible coût à une très bonne performance environnementale.

Les équipements du brûleur TP

L'équipement standard est prévu pour les combustibles gazeux et les combustibles liquides. Deux brûleurs sont disponibles pour les combustibles liquides ou gazeux et sont montés sur une chambre de combustion en acier inoxydable.

- Le Kit brûleur pour combustibles gazeux C492A incluant une soufflante, un boîtier de contrôle, une vanne, deux tête interchangeable pour brûler des gaz naturels (méthane) ou des gaz type GPL développant une puissance jusqu'à environ 117 kW. L'arrivée de gaz traverse un détendeur, un rotamètre, le débit étant modulable à l'aide d'une vanne placée en aval.

- Le Kit brûleur pour combustibles liquides C492B incluant une soufflante, un boîtier de contrôle. Atomisation par jet pressurisé entre 11 et 14 bars. Deux gicleurs interchangeables (5.1 & 7.57 l/h) fonctionnant de 7 à 12.5 bars avec un angle de pulvérisation de 60°. La puissance maximale autorisée est de 140 kW. Une vanne de sélection du combustible liquide, placée en amont d'un débitmètre à flotteur, est prévue pour une alimentation par gravité en fuel ou en kérosène.

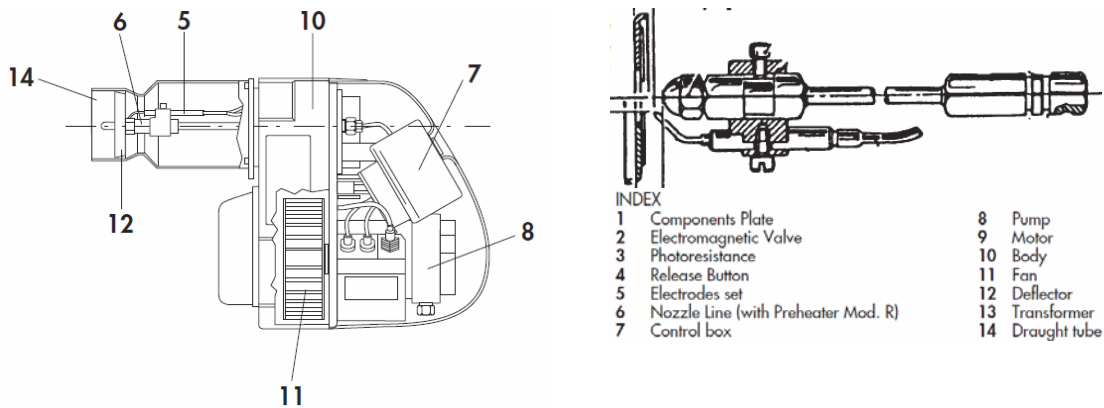


Figure 6: Schéma du Bruleur Lamborghini ECO10 (carburant liquide)

Type	Bruleur liquide ECO10
Output (kg/h)	5-10.5
Output (kW/h)	59.3-124.5
Injection pressure range (bars)	11-14

Quelques chiffres:

- Gaz naturel à une pression maximale de 50 mbar, consommation maxi d'environ 8.4 Kg/hr.
- GPL; propane, butane ou mélange à 2 bars maxi, consommation maxi (propane 7.4 Kg/h) (butane 10.0 Kg/h)
- Kérozène et/ou fuel en bidon portables fournis - consommation maxi environ 10 l/h (Fuel : viscosité 0.015-0.055 cm²/s— densité 835 Kg/m³, Kérosène : 0.011-0.020 cm²/s—densité 790 Kg/m³)

4. Instrumentations complémentaires

L'analyse des gaz de combustion est possible grâce à la sonde de prélèvement de gaz. Tous types d'analyseurs de gaz standard, chromatographe, etc, peuvent également convenir. Des mesures précises de la quantité de chaleur évacuée par l'eau de refroidissement et de la température des gaz brûlés facilitent la détermination de l'influence des principaux paramètres qui contribuent à l'utilisation efficace des combustibles liquides et gazeux.

- **une sonde d'analyse des fumées**, refroidie par une circulation d'eau, est placée dans l'axe de la chambre. Cette sonde, légèrement recourbée à son extrémité peut être balayée angulairement (disque comportant des graduations angulaires). Elle peut être couplée à un analyseur.

- **un thermocouple** placé transversalement dans le conduit d'évacuation renseigne sur la température des fumées. Deux positionnements sont possibles :

- dans la partie horizontale de la cheminée, immédiatement en aval de la paroi externe de la chambre de refroidissement. Le capteur placé dans cette position fait face à l'ensemble brûleur flamme, et reçoit ainsi une quantité considérable de chaleur (apport radiatif).
- dans la partie verticale de la cheminée, de façon à le protéger du rayonnement thermique intense.

- **la bougie d'allumage** enflamme le combustible par une étincelle entre ses électrodes. En cas d'extinction, le détecteur de présence de flamme (à UV) renseigne l'électronique qui coupe les électrovannes d'arrivée des combustibles.

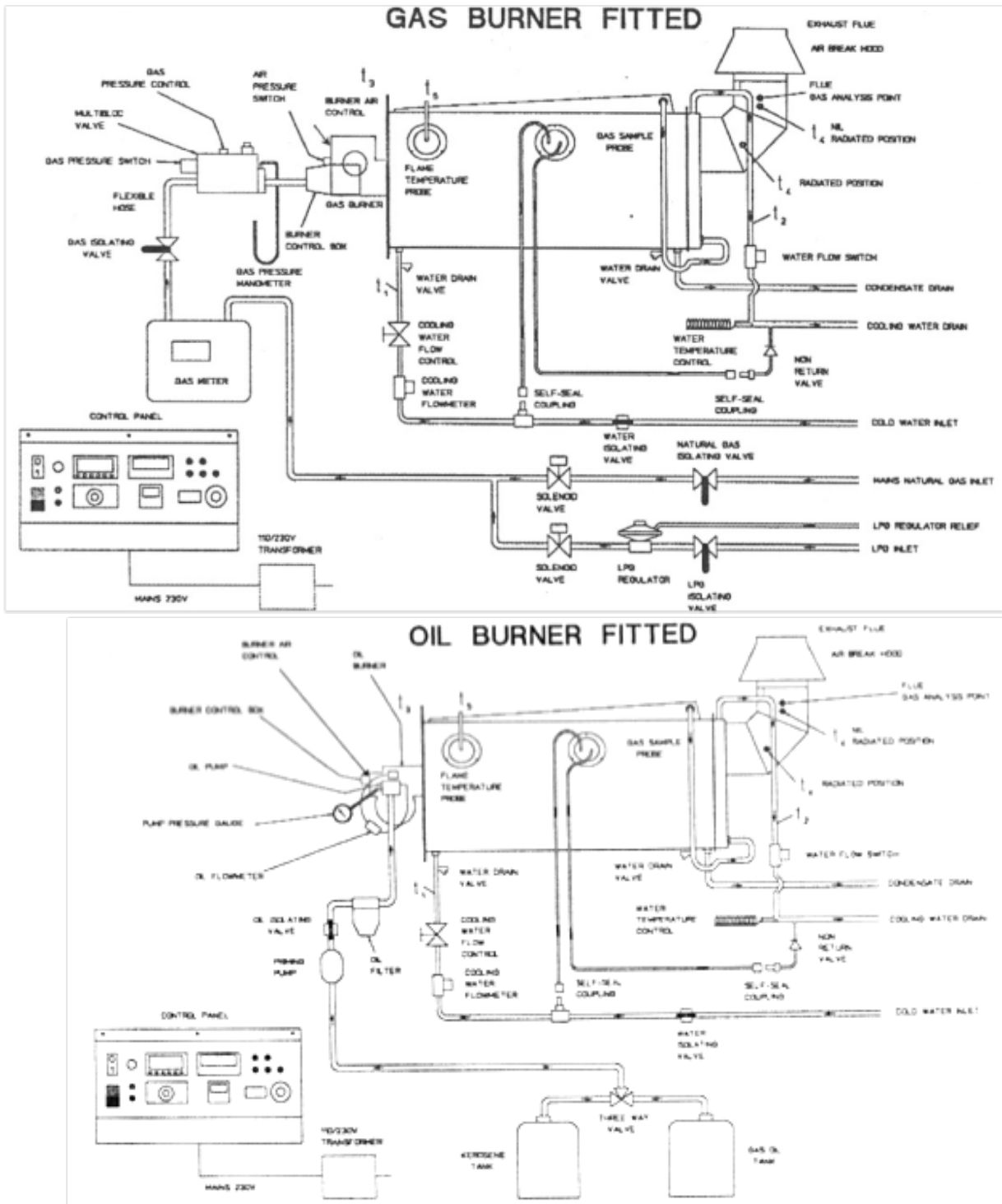


Figure 7: Schéma de l'installation pour un montage gaz et liquide

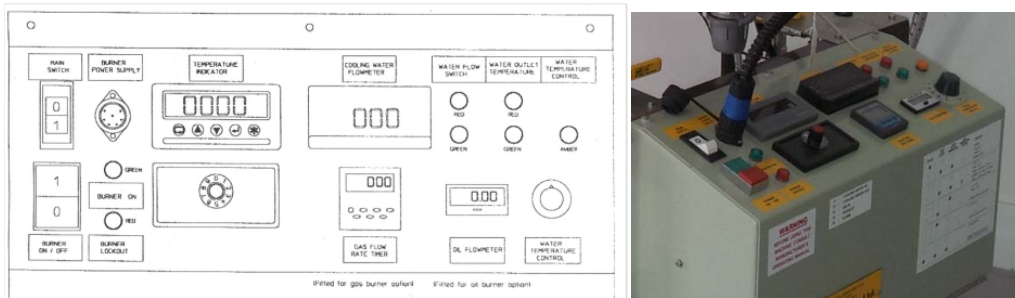


Figure 8: Panneau de control et statut de fonctionnement (couleur des lampes)

C. Etudes expérimentales

1. Etude de la plage de fonctionnement du brûleur

Le but de cette étude est de se familiariser avec l'installation complète.

Page |
12

Un brûleur a une plage de fonctionnement qui va se traduire par l'étendue de la puissance produite comme le montre la figure suivante. On définit alors le rapport (turndown ratio TR) calculé entre la puissance maximale et minimale avant l'extinction.

Vous vous placerez au débit de carburant maximal atteignable par le brûleur, et nous allons chercher la puissance minimale d'extinction. Il faut **diminuer progressivement les deux débits de combustible et d'air dont on conservera la même proportion**. On comparera cette puissance à la puissance nominale. Ce rapport est habituellement de 1/2 pour le modèle ECO 10.

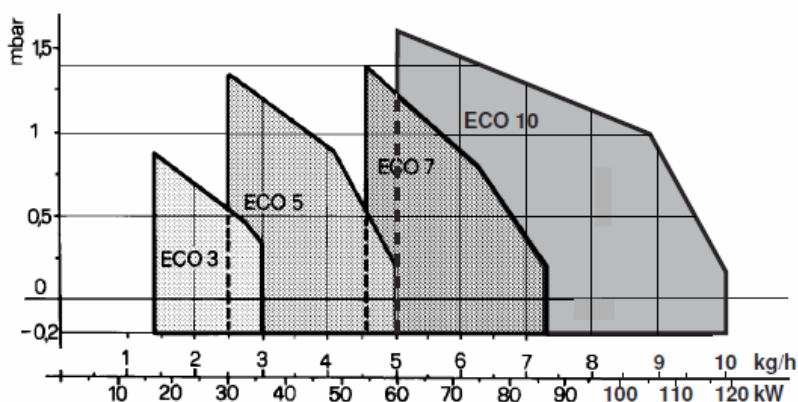


Figure 9: Plage de fonctionnement du brûleur liquide ECO 10

Procédure:

- Démarrer en respectant la procédure d'allumage décrite en annexe.
- Faire le réglage de la pression d'injection à 14bars
- S'assurer de la stabilité thermique de l'installation. Les conditions de température de sortie de l'eau de refroidissement doivent rester constantes. Stabiliser la température de sortie d'eau à une valeur comprise entre 60 et 70°C en modifiant le débit.
- Pour un débit de combustible donné, moduler le débit d'air de façon à obtenir un rapport stœchiométrique (en masse) d'environ 14.4:1. Pour chaque réglage de débit de carburant, le débit d'air est ajusté grâce à la mesure de la concentration de CO₂ des émissions de fumées. On doit atteindre environ 11% à 13.7% en concentration volumique, ce qui correspond à un réglage proche de la stœchiométrie. La formule équivalente du carburant gazoil est C_{10.82}H_{18.72}.
- Diminuer progressivement les débits d'air et de carburant, en respectant le même rapport, tout en surveillant la flamme et jusqu'à l'obtention de son extinction.
- Une fois le balayage complet effectué, vous répérez la procédure pour une valeur de la pression de la pompe autour de 11 bars.

En annexe est fournie une feuille tableau de prise de donnée et une feuille tableau de résultats.

Vous commenterez alors les résultats obtenus en expliquant la nature du phénomène.

2. Influence de la richesse du mélange et de la nature du combustible sur les caractéristiques de la flamme sur les émissions, comparaison avec le cas théorique

La richesse du mélange influe énormément sur le fonctionnement d'un four ou d'une chaudière, sur le rendement thermique (pertes thermiques aux fumées) et sur le rendement de combustion (pertes par imbrûlés). Le dosage stœchiométrique est différent pour chaque carburant dépendant de sa composition chimique (voir Tableau 2).

Nous allons faire varier la richesse (ou l'excès d'air) successivement pour un combustible en se plaçant sur un point de fonctionnement de pompe intermédiaire (12 bars) et un débit de carburant de 6.5l/h. et relever l'analyse et la température des fumées ainsi que le débit et les températures d'entrée et sortie d'eau de refroidissement de l'enceinte (voir tableau fourni). Nous pourrons ainsi en déduire le flux thermique aux parois (efficacité du transfert thermique entre la flamme et la charge), les pertes thermiques aux fumées et les pertes par imbrûlés.

Procédure:

- Démarrer en respectant la procédure d'allumage décrite en annexe.
- réduire au maximum la dilution d'air
- Faire le réglage de la pression d'injection à 12bars et atteindre le débit de carburant à une valeur de 6.5l/h
- Les conditions de stabilité thermique étant remplies (attention la mise en température est assez longue : cinq minutes après chaque modification de fonctionnement), on relèvera les débits de combustible et les émissions polluantes (CO₂ et O₂) qui nous permettront d'en déduire le débit d'air. On notera les caractéristiques spécifiques de la flamme obtenues à l'aide de critères tels que aspect de la flamme, longueur, niveau de bruit dans le tableau fourni.
- Le débit d'eau sera modulé (environ 200g/s) de façon à obtenir une température de sortie comprise entre 60 et 80°C.
- On effectuera plusieurs essais pour air/gaz en augmentant progressivement la quantité d'air (5- points). Pour ce faire, on modifiera le débit d'air tout en conservant le débit de combustible. On ne fera pas d'analyse de fumées pour les mélanges trop riches (CO > 40000 ppm) sous peine d'empoisonnement de la cellule CO.
- Pour compléter cette expérience, nous comparons alors les données des émissions expérimentales avec les émissions théoriques. Pour pouvoir résoudre le problème, il faut alors faire une hypothèse sur la composition du carburant utilisé.

Interpréter et conclure sur les résultats obtenus

3. Bilan d'énergie

Le bilan d'énergie est indispensable pour traduire la façon dont l'énergie est utilisée et dégradée.

- Sur un point de fonctionnement (cas d'un débit moyen de carburant avec un excès d'air très faible proche de la stoechiométrie), une température de refroidissement de 80°C (limite de la valeur de consigne de coupure), vous effectuerez le relevé de l'ensemble des grandeurs.
- La même procédure sera reproduite pour des excès d'air plus important
- Vous proposerez une méthodologie de calcul du bilan thermique en donnant le détail des pertes observées.
- Que pouvez vous conclure sur le meilleur réglage donnant la meilleure efficacité thermique.

D. Annexes

1. Feuille de calcul

a) Calcul de la richesse ou de l'excès d'air à partir d'une analyse de gaz

Page | Les analyseurs fournissent des résultats d'analyse en teneur volumique en CO₂, CO, HC, NO,
14 NO₂, O₂ et particules dans le cas standard.

En fonction du principe de fonctionnement des appareils, l'analyse devra s'effectuer en base humide ou en base sèche : élimination de l'eau contenue dans les gaz d'échappement, prise en compte ou non de la teneur en vapeur d'eau.

Comme le bruleur condense l'eau à sa sortie sous forme de condensat, l'analyse sera ici en base sèche. Il faut distinguer le cas des mélanges stœchiométriques ou pauvres, et celui des mélanges riches.

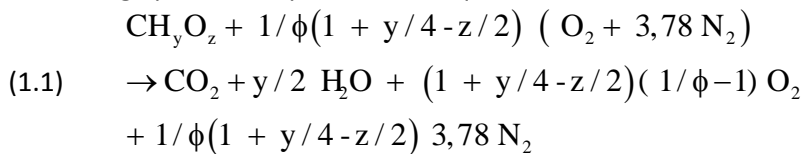
On donne ici les différents cas de figure d'un calcul de richesse à partir d'une analyse de gaz.

On notera que le bruleur fonctionne en mélange pauvre.

Le carburant non oxygéné (gasoil) a pour formule moyenne C_{10.82}H_{18.42}. (y=1.70, z=0)

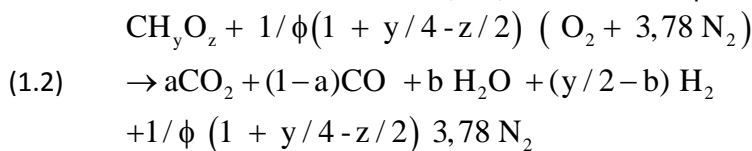
Mélanges stœchiométriques ou pauvres L'équation de combustion s'écrit :

En mélange pauvre, on peut écrire l'équation de combustion sous la forme :

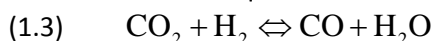


Mélanges riches. Équilibre du gaz à l'eau

Il se forme alors simultanément CO₂, CO, H₂O et H₂. L'équation de combustion devient :



Pour des mélanges riches, il faut introduire une réaction supplémentaire qui est la réaction du gaz à l'eau considéré en équilibre.



On peut considérer que la réaction est en équilibre et ceci est décrit par la constante d'équilibre K:

$$(1.4) \quad K(T) = \frac{X_{\text{H}_2\text{O}} X_{\text{CO}}}{X_{\text{CO}_2} X_{\text{H}_2}} = \frac{(1-a)b}{(\frac{y}{2} - b)a} = 3,8$$

où K(T) peut être décrit par la corrélation suivante avec X_{CO}, X_{CO₂}, X_{H₂O}, X_{H₂}, et fractions molaires des différents constituants des gaz d'échappement.

$$\ln K(T) = 2,743 - \frac{1,761 \cdot 10^3}{T} - \frac{1,611 \cdot 10^6}{T^2} - \frac{0,2803 \cdot 10^9}{T^3}$$

En réalité, l'expérience montre que la composition des gaz mesurée à l'échappement correspond dans tous les cas à un figeage de la réaction précédente à une température de l'ordre de 1 700 K, pour laquelle la constante d'équilibre K vaut 3,8.

En faisant intervenir le bilan matière en oxygène :

$$(1.5) \quad a + b + 1 = 2(1 + y/4 - z/2) / \phi + z$$

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

Calcul de la richesse à partir de l'analyse des gaz d'échappement

Elle prend en compte les indications fournies par des analyseurs très précis de CO₂, CO, de produits imbrûlés, éventuellement d'oxygène, pour déterminer, en amont, la composition du système réactionnel air-carburant. Plusieurs méthodes ont été proposées ; la plus répandue, appelée CO₂ total, consiste à effectuer un bilan carbone incluant les faibles quantités de produits résultant d'une combinaison incomplète (CO en mélange pauvre et hydrocarbures imbrûlés quelle que soit la richesse).

Page |
15

$$(1.6) \quad C_{\text{total}} = [\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]$$

Pour un mélange pauvre ou stœchiométrique à partir de la réaction (1.1), on peut écrire :

$$C_{\text{total}} = \frac{100}{1 + (1 + y/4 - z/2)(1/\phi - 1) + 1/\phi(1 + y/4 - z/2)} 3,78$$

soit

$$(1.7) \quad \phi = \frac{4.78C_{\text{total}}(1 + y/4 - z/2)}{100 + C_{\text{total}}(y/4 - z/2)}$$

Pour un mélange riche

$$C_{\text{total}} = \frac{100}{1 + (1 + y/2 - b) + 1/\phi(1 + y/4 - z/2)} 3,78$$

On peut voir, à partir des relations (1.4) et (1.5), que b s'exprime en fonction de n par une équation du second degré. Il est possible ensuite, de calculer Φ en fonction de C_{total}.

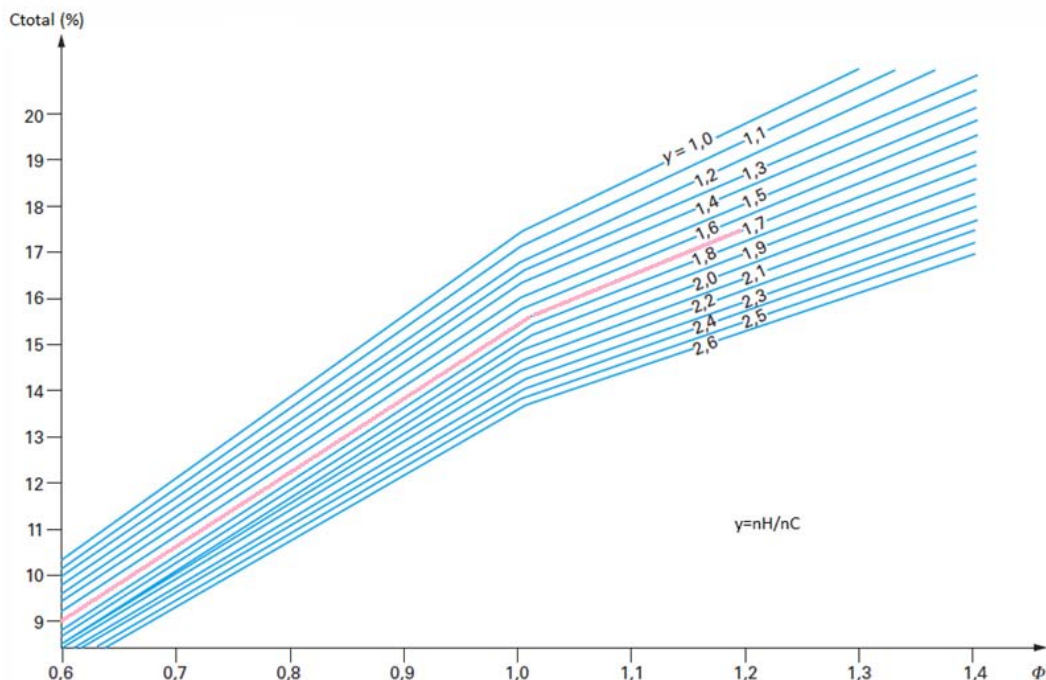


Figure 10: Calcul de la richesse en fonction du carbone total et du rapport C/H

Autres expressions:

$$\phi = \frac{12 \times ([CO_2] + [CO] + [HC])}{28 \times [N_2] + 14 \times [NO_x]} \times \frac{28 \times (1 + y/4 - z/2) \times 3,78}{12}$$

On ne commet pas une grosse erreur en négligeant les NOx (car trouvé en ppm). On utilise la relation suivante avec $[N_2] = 100 - [CO_2] + [CO] + [HC] + [O_2] + [H_2]$.

Page |
16

Dosage réel et stœchiométrique

$$F = \left(\frac{\text{masse de combustible}}{\text{masse d'air}} \right)_{\text{réel}}$$

$$F^* = \left(\frac{\text{masse de combustible}}{\text{masse d'air}} \right)_{\text{stoe}} = \frac{12 + y + 16z}{(1 + y/4 - z/2)(32 + 3.76 \cdot 28)} = 0.070$$

Débit d'air

Le débit de carburant est mesuré en litre/heure

$$\dot{m}_{\text{air}} = \frac{1}{\phi F^*} \dot{m}_c$$

\dot{m}_c (kg/h) = d \dot{m}_c (l/h) avec la densité d=0.790

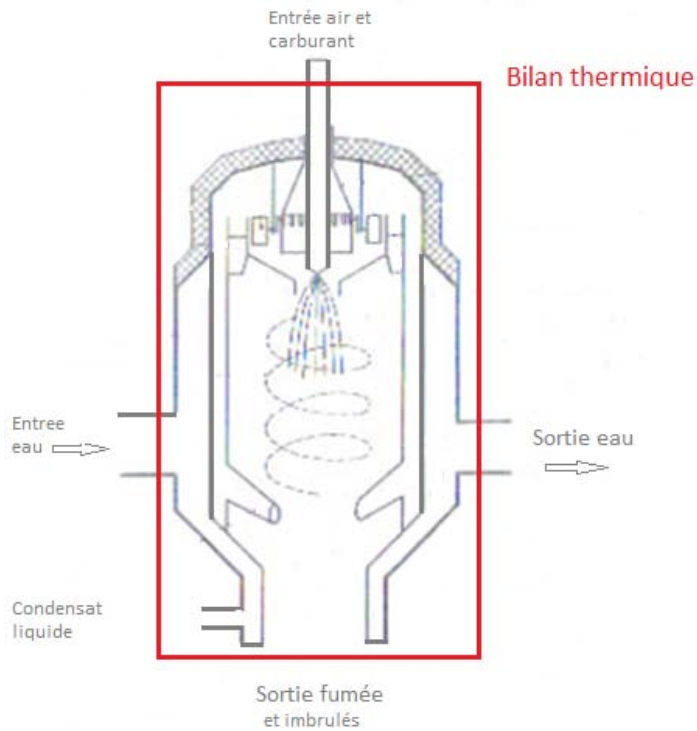
Energie introduite

$$P_{\text{calo}} = \dot{m}_c \text{PCI} (\text{kW})$$

Ecriture du bilan d'énergie

$$\frac{d\mathcal{E}_t}{dt} = \frac{d}{dt} (U + \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_p + \mathcal{E}_e) = \sum_k \dot{W}_k^u + \sum_j \dot{Q}_j^{\text{ext}} + \sum_i \pm \frac{dm_i}{dt} h_i^t$$

$$\begin{aligned} & m_{\text{pc}} \left[h_{\text{f pc}}^0 + h_{\text{pc}}(T_{\text{pc}}) - h_{\text{pc}}(T_0) \right] - m_{\text{air}} \left[h_{\text{f air}}^0 + h_{\text{air}}(T_{\text{air}}) - h_{\text{air}}(T_0) \right] \\ & - m_{\text{carb}} \left[h_{\text{f carb}}^0 + h_{\text{carb}}(T_{\text{carb}}) - h_{\text{carb}}(T_0) \right] + m_{\text{pc}} \frac{V_{\text{pc}}^2}{2} - m_{\text{air}} \frac{V_{\text{air}}^2}{2} - m_{\text{carb}} \frac{V_{\text{carb}}^2}{2} \\ & + m_{\text{eau}} \left[h_e^{\text{eau}} - h_s^{\text{eau}} \right] - m_{\text{condensat}} h_s^{\text{condensat}} = 0 \end{aligned}$$



$$PCI = PCS - \frac{y}{2} \frac{M_{H_2O}}{M_{carburant}} I_v$$

2. Consignes importantes de sécurité

- Le démarrage doit être impérativement effectué avec des combustibles gazeux, ceci durant au moins dix minutes.

- Pour des raisons de sécurité, il est indispensable de ne pas regarder au travers des cinq fenêtres d'observation pendant la phase d'allumage.

- Comme sur les fours et les chaudières, un allumage explosif peut se produire si une quantité de gaz combustible s'accumule dans la chambre de combustion. Si le système de défaut de flamme fonctionne correctement et si la procédure de démarrage décrite ci-dessous est respectée, cette inflammation accidentelle est peu probable. Cependant, à titre préventif, **on procédera systématiquement à une purge de la chambre de combustion**, en alimentant avec de l'air (débit maximal) 2 minutes avant chaque allumage. Cette procédure doit également être effectuée après une extinction de flamme (voir procédure n°4) ou si l'allumage est entravé.

- En cas d'utilisation de la sonde de prélèvement des fumées, s'assurer que la vanne de refroidissement destinée à son alimentation soit totalement ouverte.

3. Tableaux de relevés

C492 - OBSERVATIONS OIL

Date: _____ Fuel: _____
 Burner: _____
 Ambient Pressure: _____ (mbar) Nozzle 1.35 / 2.0 Usgal/hr
 Stoichiometric A/F: _____ (by volume)
 Stoichiometric A/F: _____ (by mass)
 Relative Density (SG) _____
 Ambient Temp: _____ (C)

TEST No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pump Pressure (kN/m ²)										
Fan Damper Setting (No.)										
Diffuser Setting										
Fuel Flow Rate Indicated (L/hr)										
Cooling Water Flow Rate (g/s)										
Cooling Water Inlet Temperature t ₁ (C)										
Cooling Water Outlet Temperature t ₂ (C)										
Air Inlet Temperature t ₃ (C)										
Exhaust Temperature t ₄ (C)										
O ₂ (%)										
CO ₂ (%)										
CO (ppm)										
Excess Air (%)										
Flame Temperature t ₅ (C)										
Flame Colour										
Flame Length (cm)										
Smoke No.										
Efficiency Net (%)										

C492 - DERIVED RESULTS

OIL

Date:

Fuel:

Burner:

Stoichiometric A/F:

(by volume)
(by mass)

Relative Density (SG)

(C)

Ambient Pressure:

(mbar)

Nozzle 1.35 / 2.0 Usgal/hr

Ambient Temp:

TEST No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Corrected Fuel Flow Rate (L/hr)										
A/F Ratio (by Volume)										
Air Flow Rate (by Volume) (L/hr)										
Mass Fuel Flow Rate (kg/hr)										
A/F Ratio (by Mass)										
Air Flow Rate (by Mass) (kg/hr)										
Heat Input (Q_{in}) (kW)										
Flue - Useful a (kW)										
Flue - Unburnt b (W)										
Flue - Vapour c (kW)										
Total Heat to Flue $d=(a+b+c)$ (kW)										
Heat to Water e (kW)										
Heat Output ($Q_{out}=(d+e)$) (kW)										
Difference ($Q_{in}-Q_{out}$)/ Q_{in} (%)										