

EFFICACITE

ENERGETIQUE

DOCUMENT PEDAGOGIQUE

TP Combustion expérimentale

PLATEFORME D'INGENIERIE EXPERIMENTALE
CAMPUS DE ST CYR L'ECOLE – BATIMENT 10

Table des matières

A. Introduction 2

1. Généralités sur la combustion 2

2. Conversion d'énergie et pollutions 3

 a) Azote (N₂)..... 4

 b) Dioxyde de carbone (CO₂)..... 4

 c) Oxygène (O₂)..... 5

 d) Monoxyde de Carbone (CO)..... 5

 e) Oxydes d'azote (NO_x)..... 5

 f) Dioxyde de soufre (SO₂)..... 5

 g) Les hydrocarbures (C_xH_y)..... 5

 h) Les suies 6

B. Présentation de l'installation 7

1. La chambre de combustion 7

2. Le comburant..... 7

3. Les carburants et bruleurs..... 8

 a) Les carburants les plus utilisés..... 8

 b) Les brûleurs bas-NOX..... 8

4. Les équipements du bruleur TP 9

5. Instrumentations complémentaires 10

C. Etudes expérimentales 12

1. Etude de la plage de fonctionnement du brûleur 12

 a) Procédure : 12

 b) Résultats 12

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..... 13

 a) Procédure : 13

 b) Résultats 13

3. Bilan d'énergie..... 13

 a) Procédure: 13

 b) Résultats 13

D. Annexes 14

1. Calcul de la richesse ou de l'excès d'air à partir d'une analyse de gaz 14

2. Ecriture du bilan d'énergie..... 17

 a) Hypothèses relatives à l'évacuation des fumées..... 17

 b) Notations 17

 c) Equations de bilan 18

3. Consignes importantes de sécurité..... 19

4. Tableaux de relevés 20



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, ou à de la génération de vapeur d'eau. 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 ergols). 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 conception de systèmes de conversion d'énergie ayant un impact faible en termes de GES.

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) A 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 générales 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 récupérés, 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 important de mécanique des fluides.

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, devient un enjeu majeur.

Citons en quelques aspects qui induisent des recherches et des développements 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 2015 - 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 pré mélangé, 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 (NOx)
				Vapeur d'eau

Figure 2 : Schéma d'un processus de combustion en se concentrant que sur les 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. Il est toutefois à la base de la formation des NOx.

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 de carburants carbonés. 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 fumées :

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

c) Oxygène (O₂)

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 de O₂ dans les fumées :

- 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 fumées :

- 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 violets, il aide à former de l'ozone.

La concentration typique dans les fumées:

- 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 fumées :

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

g) Les 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_{H20}=8 ; PRG_{CH4}=23 ; PRG_{N2O}=296)

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

h) Les suies

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.

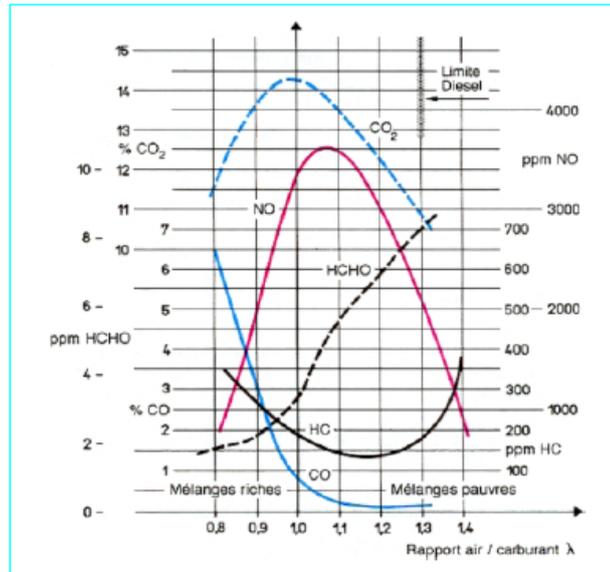


Figure 3 : Evolution de la concentration molaire des espèces majoritaires en fonction de la richesse

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 CO ₂ (%)	Gross Calorific value (MJ/kg)	Chemical Formula
Natural Gas	9.52:1	17.16:1	9.50	55.00	CH ₄
Propane	23.8:1	15.6:1	11.62	50	C ₃ H ₈
Butane	30.94:1	15.38:1	11.96	49.5	C ₄ H ₁₀
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.

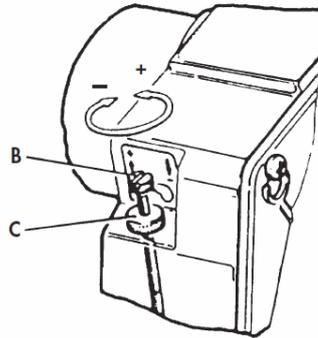


Figure 5 : Vis de réglage du débit d'air

3. Les carburants et brûleurs

a) Les carburants les plus utilisés

Les brûleurs au gaz naturel

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 NO_x 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. Elle est très efficace avec les combustibles gazeux. On distingue la recirculation externe et la recirculation interne.
- 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.

4. Les équipements du bruleur 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 têtes 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 et un rotamètre. Le débit étant modulable à l'aide d'une vanne placée en aval.

- Le Kit brûleur pour combustibles liquides C492B inclue une soufflante, un boîtier de contrôle. L'atomisation s'opère par jet pressurisé entre 11 et 14 bars. Il existe 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.

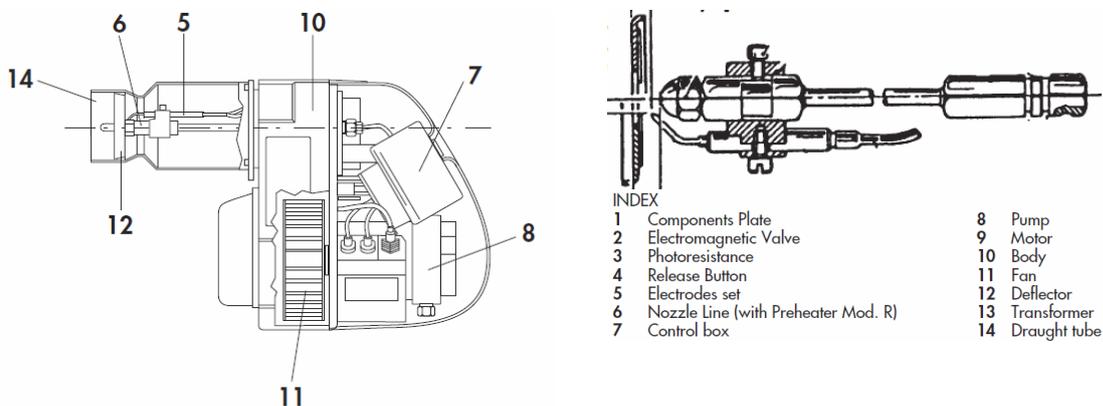


Figure 6 : Schéma du Bruleur Lamborghini ECO10 (carburant liquide)

Type	Bruleur liquide ECO10
Output (kg/h)	5-10.5
Output (kW)	59.3-124.5
Injection pressure range (bars)	11-14
Puissance pompe	100W



Données utiles :

- 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, facteur de débit = 1
 - Kérosène : 0.011-0.020 cm²/s—densité 790 Kg/m³, facteur de débit = 1.1

10 mm H₂O = 1mbar

1 Imperial Gallon = 4.546 litres

1 US Gallon= 3.785

Capacité thermique des produits de combustion $C_{pPC} = 1.15 \text{ kJ/kg K}$

5. 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. 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.

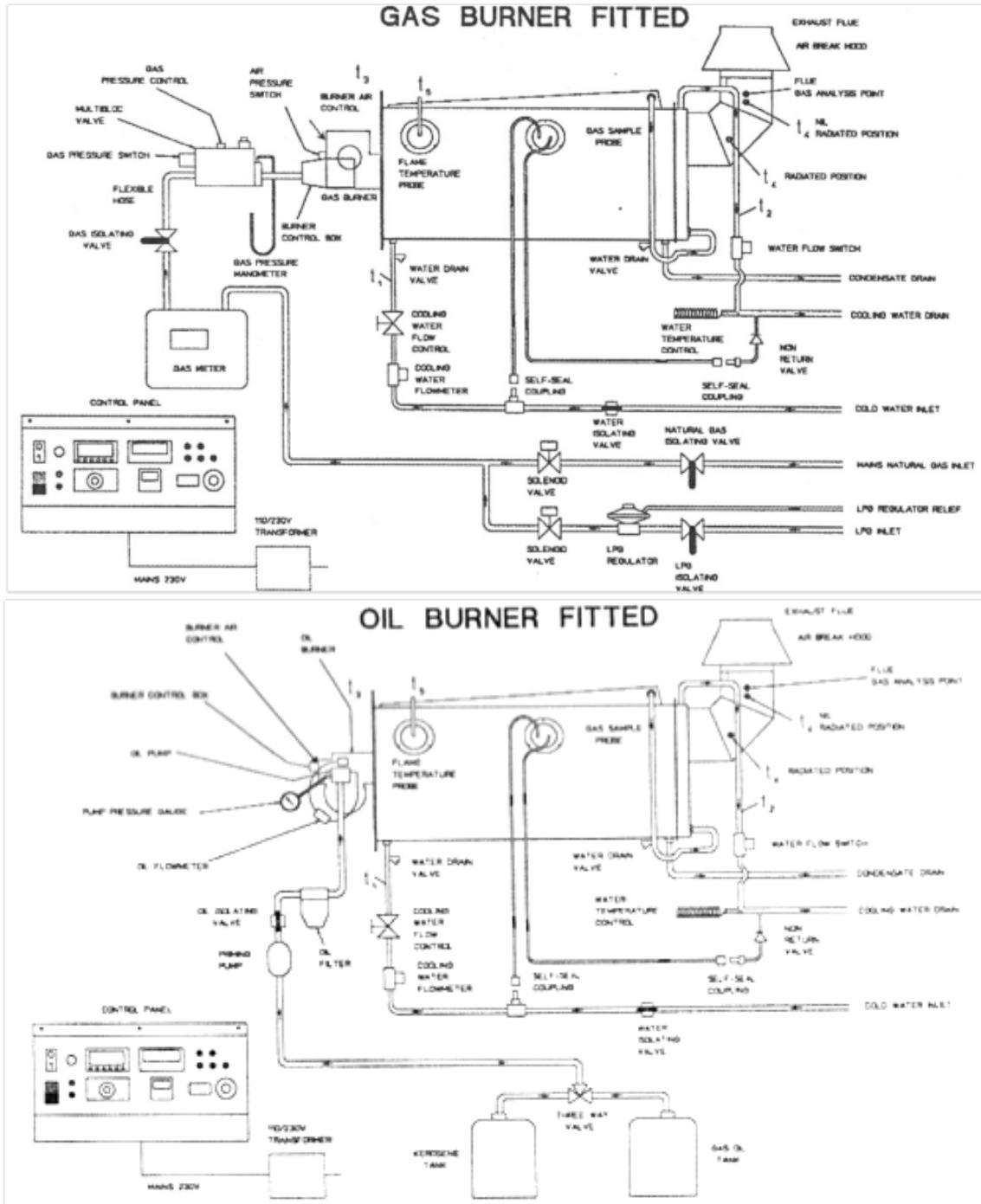


Figure 7: Schéma de l'installation pour un montage gaz et liquide

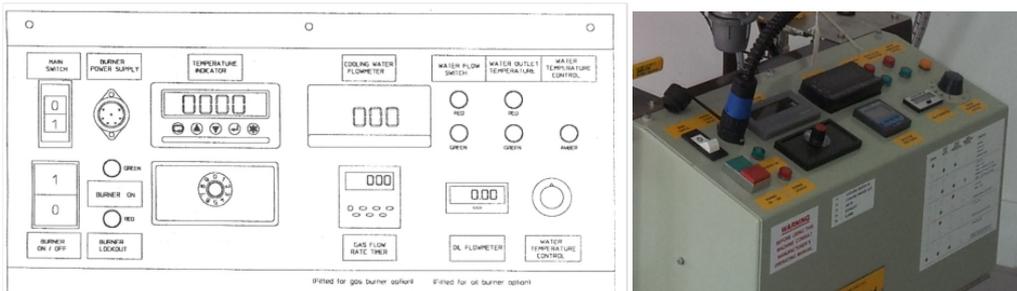


Figure 8: Panneau de control et statut de fonctionnement (couleur des lampes)

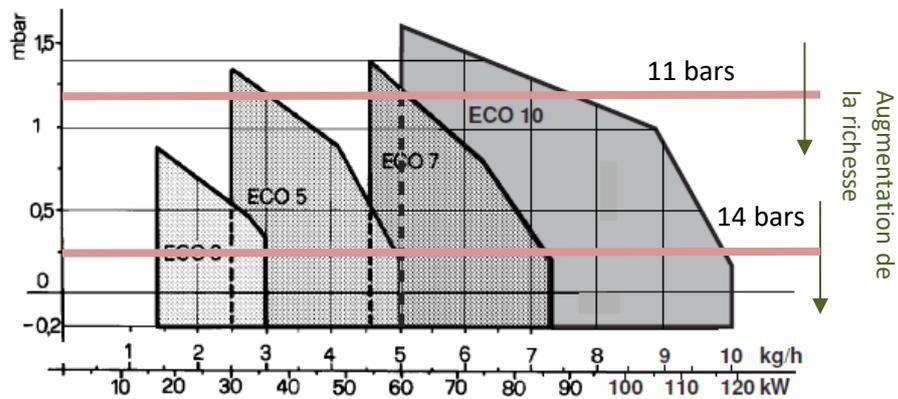
C. Etudes expérimentales

1. Etude de la plage de fonctionnement du brûleur

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

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**.

Il sera choisit un débit de carburant maximal atteignable par le brûleur afin d'atteindre la puissance nominale. Depuis ce réglage, l'objectif sera de chercher la puissance minimale d'extinction. Il faut pour cela **diminuer progressivement les deux débits de combustible et d'air dont on conservera la même proportion (contrôle grâce à l'analyse de gaz)**. On comparera cette puissance à la puissance nominale. Ce rapport est habituellement de 1/2 pour le modèle ECO 10.



a) Procédure :

- Démarrer en respectant la procédure d'allumage décrite en annexe.
- Réglage fort débit de carburant
Faire le réglage de la pression initiale 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.
- Diminuer progressivement les débits d'air (ajustement du plateau) et de carburant (ajustement de la pression), en respectant la même valeur de richesse, tout en surveillant la flamme et jusqu'à l'obtention de son extinction. 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 une stabilisation des concentrations volumiques (voir figure 10).
- Réglage faible débit de carburant
- Une fois le balayage complet effectué, vous répétez la procédure pour une valeur de la pression de la pompe autour de 11 bars.

b) Résultats

- Faire un relevé de l'ensemble des grandeurs. En annexe est fournit une feuille tableau de prise de données et une feuille tableau de résultats,
- Vous commenterez alors les résultats obtenus en expliquant la nature des phénomènes observés
- Vous estimerez le TurnDown Ratio TR.

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) avec un débit de carburant de 6.5l/h.

a) 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 (CO_2 et O_2) qui nous permettront d'en déduire le débit d'air et calculer la richesse (voir annexe D.1). On notera les caractéristiques spécifiques de la flamme obtenues à l'aide de critères tels que l'aspect de la flamme, longueur, niveau de bruit dans le tableau fourni. On relèvera le débit et les températures d'entrée et sortie d'eau de refroidissement de l'enceinte. Nous pourrons ainsi en déduire le flux thermique aux parois (efficacité du transfert thermique entre la flamme et la charge).
- Le débit d'eau sera modulé (environ 200g/s) de façon à obtenir une température de sortie comprise entre 60 et 80°C.

b) Résultats

- On effectuera plusieurs essais augmentant progressivement la quantité d'air (5 points) tout en conservant le débit de combustible constant. On ne fera pas d'analyse de fumées pour les mélanges trop riches ($\text{CO} > 40000$ ppm) sous peine d'empoisonnement de la cellule CO . On calculera la richesse pour chaque point de fonctionnement.
- On proposera une analyse qualitative de la flamme
- On vous demande de calculer le flux calorifique et le flux de chaleur donné à la chaudière afin de proposer une première estimation du rendement thermique.
- Pour compléter cette expérience, nous comparons alors les données des émissions expérimentales avec les émissions théoriques. Tracer l'évolution du CO_2 , CO et de l' O_2 en fonction de l'excès d'air. 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.

a) Procédure:

- Sur un point de fonctionnement (cas d'un débit moyen de carburant avec un excès d'air très faible proche de la stœchiométrie), une température de refroidissement de 80°C (limite de la valeur de consigne de coupure), vous effectuerez le relevé de l'ensemble des grandeurs.

b) Résultats

- 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. Calcul de la richesse ou de l'excès d'air à partir d'une analyse de gaz

Les analyseurs fournissent des résultats d'analyse en teneur volumique en CO₂, CO, HC, NO, 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. Les tableaux donnés ci après sont issus d'une analyse en gaz sec (eau condensée avant analyse des gaz).

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.

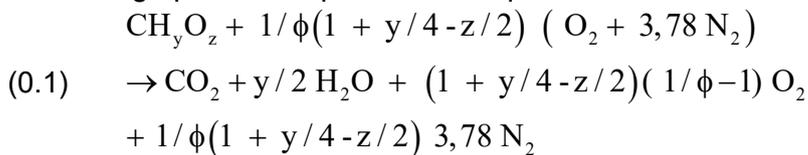
On donne ici les différents cas de figure d'un calcul de richesse à partir d'une analyse de gaz.

On notera que le bruleur fonctionne en mélange pauvre.

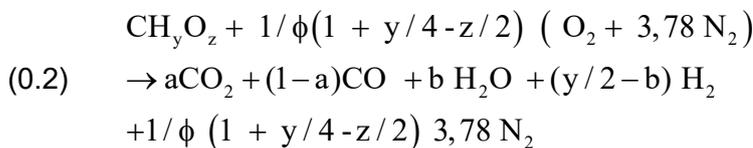
Le carburant non oxygéné (gasoil) a pour formule moyenne C_{10.82}H_{18.42}. (y=1.70, z=0)

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:

$$(0.4) \quad K(T) = \frac{X_{\text{H}_2\text{O}} X_{\text{CO}}}{X_{\text{CO}_2} X_{\text{H}_2}} = \frac{(1-a)b}{(\frac{y}{2} - b)a} = 3,8$$

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 :

$$(0.5) \quad a + b + 1 = 2(1 + y/4 - z/2) / \phi + z$$

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).



$$(0.6) \quad C_{\text{total}} = [\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]$$

Pour un mélange pauvre ou stœchiométrique à partir de la réaction(0.1), 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

$$(0.7) \quad \phi = \frac{4.78C_{\text{total}}(1 + y/4 - z/2)}{100 + C_{\text{total}}(y/4 - z/2)}$$

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 (0.4) et (0.5), 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}.

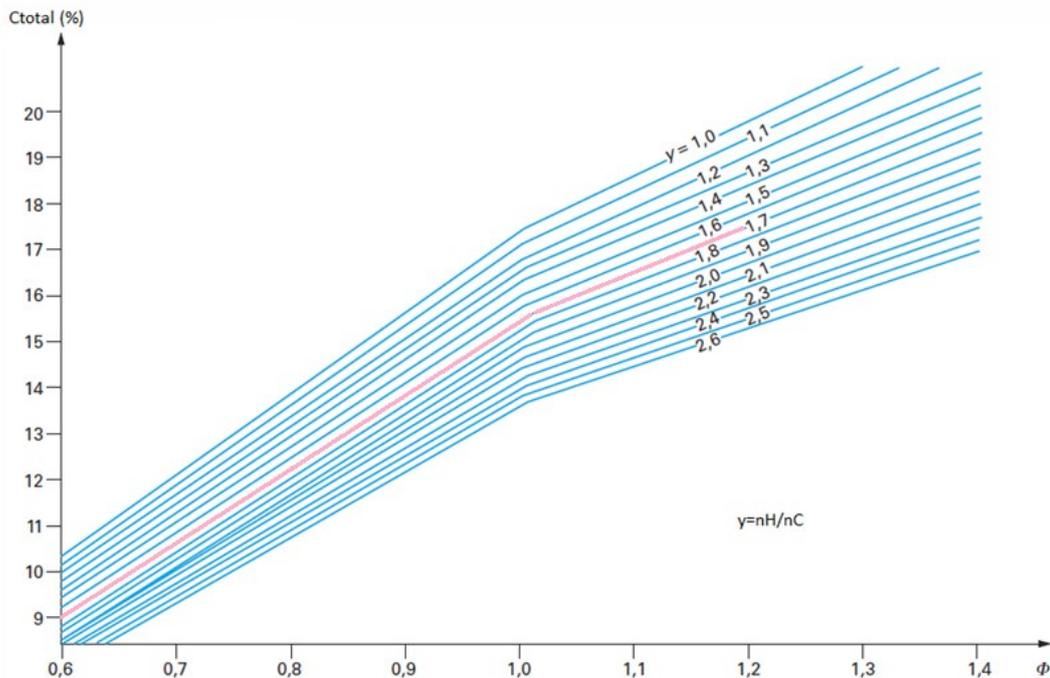


Figure 10 : Calcul de la richesse en fonction du carbone total et du rapport C/H

Richesse	% CO ₂	% H ₂ O	% O ₂	% N ₂
1	15.73	-	0	84.27
0.9	14.06	-	2.23	83.71
0.8	12.42	-	4.42	83.16
0.7	10.79	-	6.59	82.62

Figure 11 : Valeur des concentrations volumiques théoriques en gaz sec (hyp mélange pauvre idéal). Formule équivalente du carburant gazoil est donnée par $C_{10.82}H_{18.72}$

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 NO_x (car trouvé en ppm). On utilise la relation suivante avec $[N_2] = 100 - [CO_2] + [CO] + [HC] + [O_2] + [H_2]$.

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

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

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

Energie introduite

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

2. Ecriture du bilan d'énergie

a) Hypothèses relatives à l'évacuation des fumées

L'écriture du bilan d'énergie ou d'exergie fait référence à la frontières 1 et considère que l'énergie contenue dans les fumées est perdue par diffusion et refroidissement dans l'atmosphère.

- Les fumées ont la composition théorique issue de la combustion d'un mélange pauvre.
- Le régime est stationnaire
- On tient compte des pertes par condensat
- On tiendra compte des travaux de ventilation et de compression de la pompe de carburant
- On considère que la température de sortie des condensats liquide est $T_{\text{cond}}=373\text{K}$
- On négligera les pertes radiatives des parois de la chambre de combustion dans l'application numérique finale.
- L'air est à la température $T_{1a}=T_a$ de la pièce.

b) Notations

On utilisera de façon appropriée les localisations des lignes (1_C,2_C,3_C pour le carburant), (1_A,2_A,3_A pour l'air), (1_E,2_E pour le circuit d'eau) et 4, 5 représente la zone de combustion, 5,6 l'évacuation des fumée et 6,7 la dilution des fumées avec de l'air de dilution. Les notations suivantes seront utilisés dans les développements demandés.

$\dot{W}_c, \dot{W}_a, \dot{W}_f$: Puissance électrique des moteurs de la pompe à combustible, du ventilateur de soufflage d'air et du ventilateur de tirage des fumées.

\dot{Q}_i : Puissance perdue à l'atmosphère par les fumées faisant l'hypothèse de post combustion des imbrûlés et du refroidissement jusqu'aux conditions atmosphériques.

\dot{Q}_{cr} : Puissance perdue à l'atmosphère par les pertes aux parois convectives et radiatives

\dot{Q}_e : Puissance thermique fournie au réseau d'eau par convection et radiation des gaz de combustion.

\dot{m}_e : débit d'eau

\dot{m}_c : débit de combustible

\dot{m}_a : débit d'air à l'admission

\dot{m}_F : débit des fumées dans le tuyau d'évacuation composées de produits de combustion et d'imbrûlés

\dot{m}_{cond} : débit des condensats

F : dosage, rapport des débits \dot{m}_c sur \dot{m}_a

$h_i(T) = \Delta h_{f_i}^0 \Big|_{p_0, T_0} + h_i(T) - h_i(T_0) + e_{c_i}$: enthalpie totale (on négligera les énergies

cinétiques)

$\hat{h}_i(T) = h_i(T) - h_i(T_0)$: sur-enthalpie du corps i

ΔH_R° : enthalpie de réaction aux conditions standards

$\Delta H_{R_i}^\circ$: enthalpie de réaction idéale aux conditions standards

$\Delta H_{R_{\text{imb}}}^\circ$: enthalpie de réaction aux conditions standards des imbrûlés

$h_i^{\text{co}}(T) = h_i(T) - T_a s_i(T, P_i)$: co-enthalpie du corps i

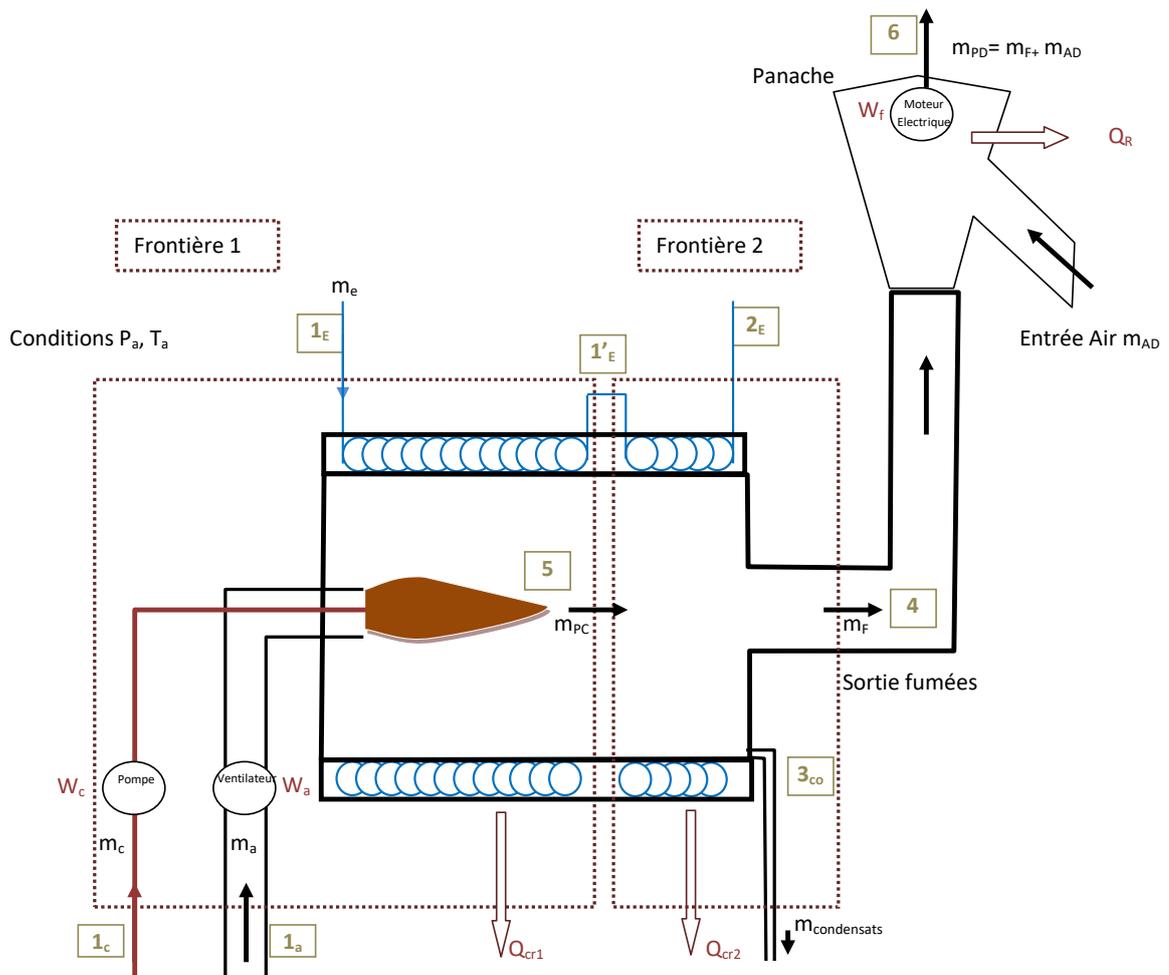
Q_j^{co} : co quantité de chaleur

$Q_{\text{c}ij}$: quantité de chaleur convective et radiative avec l'atmosphère

η_e : rendement énergétique

η_x : rendement exergetique

P_{ex}^j : pertes exergetiques de type j



c) Equations de bilan

Sur la frontière 1

$$\dot{m}_a [h_{fa}^0 + h_a(T_a) - h_a(T_0)] + \dot{m}_c [h_{fc}^0 + h_c(T_c) - h_c(T_0)] - \dot{m}_{pc} [h_{fpc}^0 + h_{pc}(T_5) - h_{pc}(T_0)] + \dot{m}_e [h_{1e}(T_{1E}) - h_{1'e}(T_{1'E})] + \dot{W}_c + \dot{W}_a + \dot{Q}_{cr1} = 0$$

Sur la frontière 2 (intérêt d'une chaudière à condensation)

$$\dot{m}_{pc} h_{t_{pc}}(T_5) - \dot{m}_F h_{t_F}(T_4) - \dot{m}_{cond} h_s^{cond}(T_{cond}) + \dot{m}_{eau} [h_{1'e} - h_{2e}] + \dot{Q}_{cr2} = 0$$

Si on fait l'hypothèse que l'eau est complètement condensée, alors : $\dot{m}_{pc} = \dot{m}_{cond} + \dot{m}_F$

$$\dot{m}_e [h_{2e} - h_{1'e}] = \underbrace{\dot{m}_{cond} (L_v + h_{cond}(T_{cond}) - h_{cond}(T_5))}_{\text{récupération chaudière à condensation chaleur sensible et latente}} + \underbrace{\dot{m}_F (h_{t_F}(T_4) - h_{t_F}(T_5))}_{\text{Récupération chaleur sensible refroidissement des produit de combustion}} + \underbrace{\dot{Q}_{cr2}}_{<0}$$

Sur la frontière 1 + 2

$$\dot{m}_a h_{t_a}(T_a) + \dot{m}_c h_{t_c}(T_c) - \dot{m}_F h_{t_F}(T_4) - \dot{m}_{cond} h_{cond}(T_{cond}) + \dot{W}_c + \dot{W}_a + \dot{Q}_{cr} + \dot{m}_{eau} [h_{1e} - h_{2e}] = 0$$

$$-\dot{m}_c \Delta h_R^0 + \dot{m}_a \hat{h}_a + \dot{m}_c \hat{h}_c - \dot{m}_F \hat{h}_F - \dot{m}_F h_{f_F}^0 - \dot{m}_{cond} h_{cond}(T_{cond}) + \dot{W}_c + \dot{W}_a + \dot{Q}_{cr} + \dot{m}_{eau} [h_{1e} - h_{2e}] = 0$$

- Terme de refroidissement du circuit d'eau

$$\dot{m}_e [h_{2e} - h_{1e}] = \dot{m}_e C_{eau} \Delta T$$

- Apport de chaleur chimique

$$-\dot{m}_c \Delta h_R^0 = \dot{m}_c \eta_{\text{comb}} \text{PCI}$$

- Rejet thermique et chimique à l'échappement (post combustion des imbrulés en particulier le $\text{CO} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$)

$$\dot{m}_F \hat{h}_F + \dot{m}_F h_{f_F}^0 = m_F h_F(T_4) + m_F \frac{M_{\text{CO}}}{M_F} X_{\text{CO}} (h_{f_{\text{CO}}}^0 - h_{f_{\text{CO}_2}}^0)$$

La masse molaire des fumées peut être calculé grace à l'analyse de gaz

Exemple : richesse 0.7, $x_{\text{CO}_2}=10.8\%$, $X_{\text{CO}}=500\text{ppm}$, $x_{\text{O}_2}=6.6\%$, $x_{\text{N}_2}=82.6\%$, donne $M_F=30\text{g/mole}$

- Terme lié à l'eau condensé : $\dot{m}_{\text{cond}} h_{\text{cond}}(T_{\text{cond}})$

Il faut mesurer m_{cond} ou l'estimer

$$\dot{m}_{\text{cond}} = \dot{m}_{\text{PC}} \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{PC}}} X_{\text{H}_2\text{O}}$$

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

3. 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.

4. Tableaux de relevés

C492 - OBSERVATIONS OIL

Date: _____ Fuel: _____
 Burner: _____
 Ambient Pressure: _____ (mbar) Nozzle 1.35 / 2.0 Us gal/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: _____

Ambient Pressure: _____ (mbar)

Stoichiometric A/F: _____ (by volume)

Stoichiometric A/F: _____ (by mass)

Nozzle 1.35 / 2.0 Usgal/hr

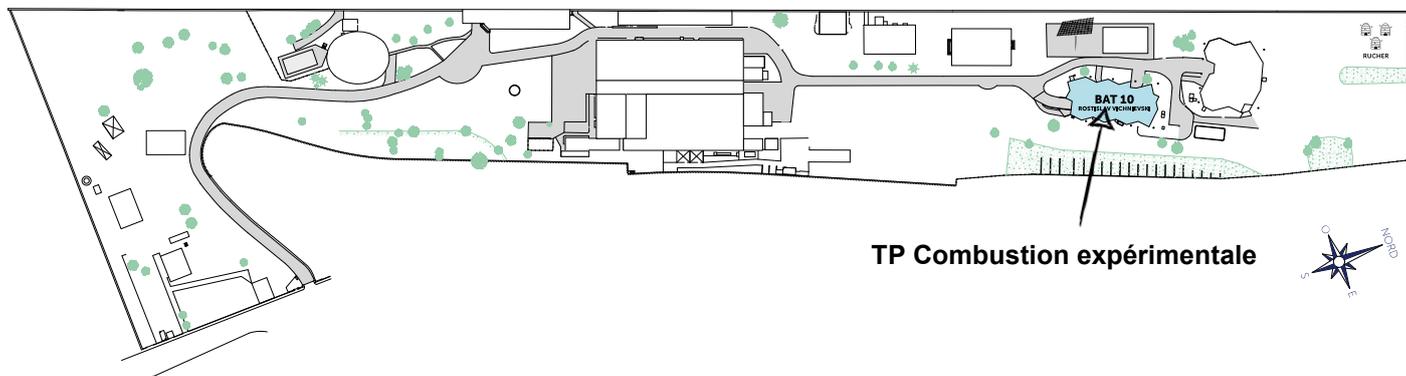
Relative Density (SG) _____

Ambient Temp: _____ (C)

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 ($(Q_{in}-Q_{out})/Q_{in}$) (%)										

SORBONNE UNIVERSITE

Faculté des Sciences et Ingénierie
Plateforme d'Ingénierie Expérimentale
Campus de Saint-Cyr-l'Ecole
2 Place de la Gare de Ceinture
78210 SAINT CYR L'ECOLE



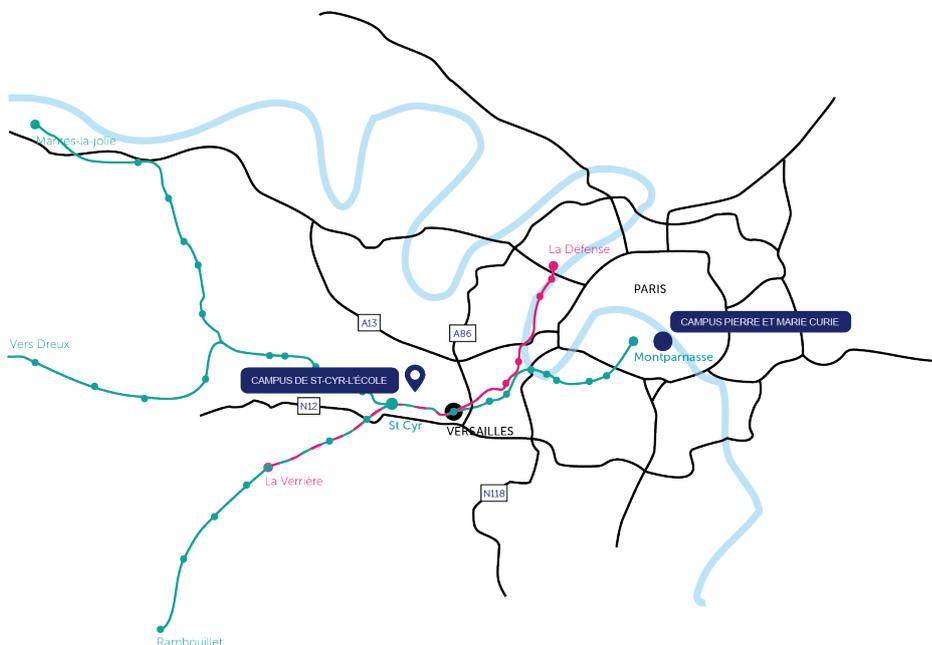
Campus de St Cyr - Sorbonne Université

REJOINDRE LA PLATEFORME

Accès en train, arrêt Saint Cyr :
Depuis Montparnasse, ligne N
Depuis La Défense, ligne U
Depuis Saint Michel ND, RER C
Prévoir ensuite 10 mn de marche

Accès en voiture :
Coordonnées GPS
N 48.80217°
E 2.07639

Accueil campus
01.44.27.95.64
Informations et réservations TP
01.44.27.95.22



→ www.sorbonne-plateforme-ingenierie-experimentale.fr