

Chapitre 1.

I- INTRODUCTION

Nombreuses industries travaillent à des températures très élevées et, pour chauffer les produits aux températures requises, il faut réaliser des combustions à température encore plus élevée. Deux moyens permettent de relever la température des produits d'une combustion:

- un préchauffage de l'aire de combustion.
- une combustion dans un air enrichi en oxygène, ou éventuellement dans l'oxygène pur.

Le préchauffage de l'air est ordinairement obtenu par échanges thermiques avec les fumées chaudes. il n'est pas techniquement limité que par la température même des fumée et par la tenue des matériaux constituant l'échangeur. des échangeurs métalliques permettent aisément de réaliser un préchauffage de l'air à 500°C ou 600°C. des récupérateurs à base d'éléments réfractaires, permettent de préchauffer l'air à plus haute température de l'ordre de 1200°C.

Energie

(du grec) signifie force en action et est définie comme la capacité d'une matière, d'un corps ou d'un système a produire du travail. On distingue différentes formes d'énergie, en fonction du type d'apparition. De manière schématique, on peut évoquer six catégories :

- Energie mécanique (eau courante, voiture en mouvement, ressort hélicoïdal)
- Energie thermique (eau en ébullition, flamme de gaz)
- Energie chimique (réactions chimiques, combustion, explosion)
- Energie électrique (batterie automobile, courant électrique)
- Energie électromagnétique (lumière, rayonnement thermique)

- Energie nucléaire (fission nucléaire)

Les différentes formes d'énergie peuvent se transformer l'une dans une autre, la somme de toutes les énergies restant la même dans un système fermé idéal (loi de la conservation de l'énergie). Ce principe est vrai par référence à l'univers comme système. En pratique cependant, la transformation d'énergie produit plus ou moins de pertes qui influencent le rendement du processus de transformation.

Les sources d'énergie qui existent dans la nature (charbon, gaz naturel, pétrole, rayonnement solaire, force hydraulique etc.) sont désignées comme énergie primaire, les formes produites par transformation de cette dernière (électricité, chaleur etc.) sont désignées comme énergie secondaire.

Les sources d'énergie indiquées ne se distinguent pas seulement selon leur forme mais aussi quant à leur valeur énergétique. C'est pourquoi, en règle générale, on indique la quantité d'énergie qui pourrait être libérée en cas de combustion complète d'une quantité déterminée de la source d'énergie afin de disposer d'une valeur de comparaison. **Le tableau 1** contient quelques exemples à ce sujet. L'unité pour mesurer l'énergie est le joule (J).

Tab. 1 : Energie contenue dans différents combustibles

Source d'énergie	Energie contenue [MJ]
1 kg de lignite	9,0
1 kg de bois	14,7
1 kg de houille	29,3
1 m ³ de gaz naturel	31,7
1 kg de pétrole brut	42,6
1 kg de fioul léger	42,7
1 kg d'essence	43,5
Par comparaison 1 kWh	3,6

Conversion d'unités d'énergie :

1 erg 10⁻⁷ J
 1 cal 4,184 J
 1 Btu 1055,06 J
 Btu : British thermal unit

L'enrichissement du comburant en oxygène diminue la masse du ballast d'azote qui se retrouve dans les fumées. L'énergie dégagée pendant la combustion se fixe donc sur moindre

masse de produits issus de la combustion et le niveau thermique de ces produits se trouve ainsi considérablement élevé, l'effet maximal est observé dans les combustions à l'oxygène pur. Les équipements utilisés dans l'industrie pour assurer la combustion sont les fours et les chaudières.

Installations de combustion

Les installations de combustion sont des installations productrices de chaleur par la combustion de combustibles solides, liquides ou gazeux. Elles sont utilisées dans de nombreux domaines, par exemple

- aux fins de chauffage (centrales de chauffage et chauffage des bâtiments),
- pour la production d'énergie électrique,
- pour la production de vapeur ou d'eau chaude (utilisation p.ex. dans des installations techniques),
- pour la production de certains matériaux (utilisation p.ex. dans l'industrie du ciment, du verre ou de la céramique),
- aux fins de traitement thermique de surface de pièces métalliques,
- pour la combustion des déchets et matériaux usages (déchets, pneus usages et autres).

La combustion a lieu dans un foyer ; les autres composants de l'installation servent à l'alimentation et à la répartition du combustible, à l'alimentation en air comburant, au transfert de chaleur et à l'évacuation des gaz et résidus de combustion (cendres et scories).

Les combustibles solides sont brûlés soit dans un lit fixe, un lit fluidisé ou dans un nuage pulvérisé. Les combustibles liquides sont injectés dans le foyer sous forme de brouillard en commun avec l'air comburant via un brûleur ; les combustibles gazeux sont mélangés à l'air comburant dans le brûleur.

Les gaz de combustion (également appelés "gaz de fumée") des installations de combustion contiennent les produits des réactions entre le combustible et l'air de combustion ainsi que des matières résiduelles, c'est-à-dire - essentiellement - des poussières, des oxydes de soufre et

d'azote et du monoxyde de carbone. En cas de combustion de charbon, les gaz de combustion peuvent aussi contenir des HCl et HF, en cas de combustion de déchets aussi les composants de ces derniers (également des HCl et HF mais aussi différents hydrocarbures, des métaux lourds etc.).

Le processus de combustion

Dans le cadre de la protection de l'environnement, les gaz de combustion des installations de combustion sont sujets à des règlements sévères concernant les valeurs limites admissibles de substances nocives telles que les poussières, les oxydes de soufre et d'azote et le monoxyde de carbone présents dans le gaz épure (lors du rejet dans l'atmosphère).

Pour pouvoir respecter ces limites, les installations de combustion sont équipées de dispositifs complexes d'épuration des fumées tels que des filtres à poussière et différents systèmes de dépollution des fumées (appelés aussi laveurs de fumées).

Chapitre 2.

COMBUSTIBLES ET ENERGIE DE COMBUSTION

1. Les combustibles

1.1 Définition:

Un combustible est une matière qui, en présence d'oxygène et d'énergie, peut se combiner à l'oxygène dans une réaction chimique générant de la chaleur : la combustion.

Pour les **combustibles solides et liquides**, la quantité et la composition des cendres ont une influence importante sur le choix de la technologie de combustion et aussi sur la conception des surfaces. L'humidité du combustible conditionne la température requise de l'air de combustion et elle augmente considérablement la quantité et le volume des fumées. La quantité et la qualité des matières volatiles influent sur le temps d'inflammation, la réactivité du carbone fixe et l'excès d'air nécessaire. Pour les **combustibles gazeux**, les caractéristiques clés dépendent de la composition chimique. Une variation de la teneur en CO₂ et N₂ conditionne les vitesses du gaz dans les différentes sections du brûleur, dans les buses et dans la flamme, ainsi que les températures. Les températures d'inflammation des différentes substances gazeuses varient entre 300 et 650 °C et les vitesses de combustion entre 0,1 et 2,8 m/s. Il est donc évident que le dimensionnement d'un brûleur à gaz dépend fortement de la composition du gaz à brûler.

2 La combustion des combustibles:

2.1 Combustibles solides

Le critère essentiel de la combustion du carbone fixe est le **temps de séjour des particules dans le système de combustion**. Il doit être supérieur au temps de combustion complète. La **figure** suivante montre les paramètres clés des quatre technologies industrielles de combustion hétérogène. Le type d'écoulement hétérogène résulte de la granulométrie du combustible et de la vitesse des gaz.

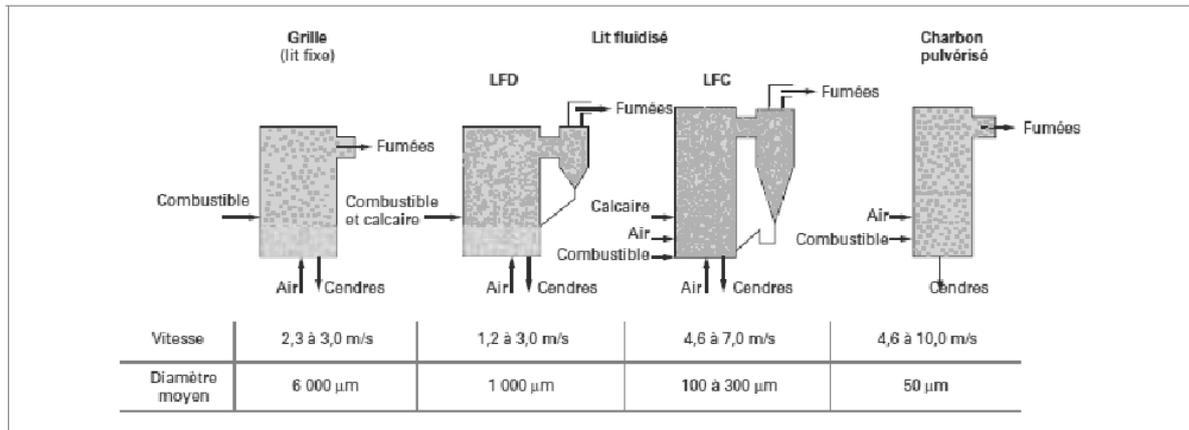


Fig.1 le système de combustion d'un combustible solide

Dans les **brûleurs à charbon pulvérisé**, le combustible est entraîné par le gaz dont la vitesse est largement supérieure à la vitesse terminale des particules de combustible et le temps de séjour de ces particules est donc bref. Puisque le temps nécessaire à la combustion d'une particule de carbone fixe baisse avec une diminution du diamètre et avec une augmentation de la température (cinétique de combustion), les systèmes à charbon pulvérisé sont basés sur une granulométrie fine et des températures de foyer élevées. La limite supérieure des températures admissibles résulte d'une part de la fusibilité des cendres et, d'autre part, des phénomènes de formation des oxydes d'azote.

Les **systèmes à grille ou lits fixes** fonctionnent à une vitesse de gaz inférieure à la vitesse minimale de fluidisation.

Les **lits fluidisés denses LFD** fonctionnent à une vitesse supérieure au minimum de fluidisation, mais inférieure à la vitesse terminale des particules. Au contraire, dans les **lits fluidisés circulants LFC**, la vitesse des gaz est supérieure à la vitesse terminale. Un cyclone est utilisé en sortie de foyer pour capter et recycler les solides. Le temps de séjour des solides dans le système de combustion et la densité de la suspension sont fortement augmentés par cette recirculation.

2.2 Combustibles gazeux

La combustion des combustibles gazeux est gouvernée d'un côté par la cinétique de la réaction d'oxydation, de l'autre côté par la vitesse de mélange entre les molécules d'oxygène et de combustible. Comme la cinétique de combustion est bien plus rapide que la vitesse à laquelle se mélangent l'écoulement d'air et l'écoulement de combustible gazeux, la majorité des brûleurs industriels à gaz fonctionne dans un régime d'écoulement turbulent qui favorise

ce mélange. Si le combustible et l'air primaire sont mélangés avant la zone de flamme (dans le brûleur), on parle d'un brûleur qui marche en mode de pré-mélange ou « pré-mix » (figure 2) 2) Si le mélange entre le combustible et l'air se fait dans l'écoulement turbulent de la flamme, on parle d'un brûleur de diffusion (figure 2) .

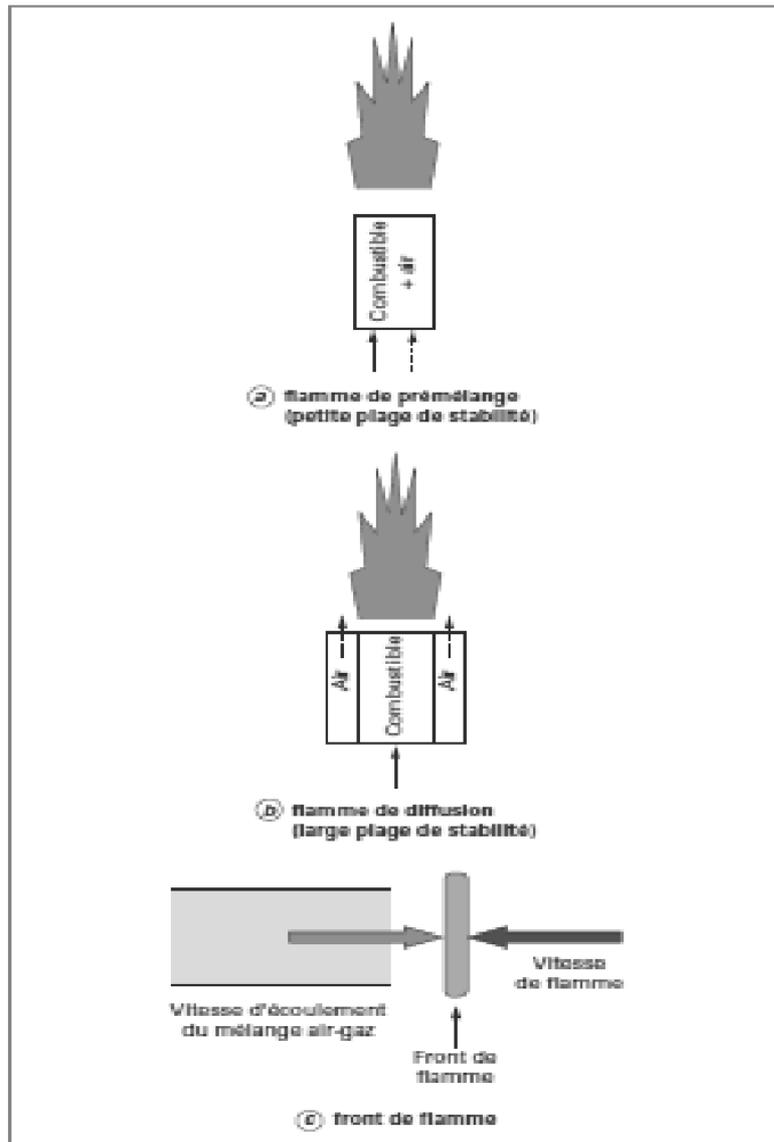


Fig. 2 Brûleurs à gaz

Pour une combustion stable, les fronts de flamme doivent rester à une position stationnaire dans le foyer. En effet, si la vitesse des gaz dans la flamme est trop faible par rapport à la vitesse de combustion, le front de flamme remonte dans le brûleur ; si elle est trop importante, la flamme se décroche et s'éteint. Comme, dans la grande majorité des brûleurs industriels, les vitesses de combustible dans les buses des brûleurs sont supérieures aux vitesses de combustion, la conception des brûleurs doit être telle qu'à l'intérieur de la flamme,

il y ait des zones à faible vitesse, voire des zones avec recirculation interne des fumées. Le ratio entre vitesse de combustion et vitesse d'écoulement doit donc rester dans une plage limitée (la zone de stabilité) qui dépend du type et de la capacité du brûleur.

L'indice de Wobbe :

$$WI = PCI (S) / \sqrt{\rho_N / \rho_{N,air}}$$

Ce dernier est utilisé pour évaluer la possibilité de brûler différents combustibles gazeux dans un brûleur donné. Ce paramètre se calcule en fonction du pouvoir calorifique supérieur PCS ou inférieur PCI (MJ/Nm^3) et de la densité standard relative du gaz par rapport à l'air $\rho_N / \rho_{N,air}$.

2.3 Combustibles liquides

La combustion des combustibles liquides a des points communs avec la combustion des combustibles gazeux, car pratiquement tous les combustibles liquides sont déjà dans leur état gazeux quand leur température d'inflammation est atteinte. Pour des brûleurs industriels, le défi principal est donc de vaporiser le combustible liquide de façon rapide et homogène. Cela est réalisé par une pulvérisation fine dans les buses du brûleur.

3. ENERGIE DE COMBUSTION

3.1 La combustion

3.1.1 Définition:

La combustion est la transformation de l'énergie chimique primaire liée dans les combustibles, tels que le charbon, le fioul, le bois, en énergie thermique secondaire par le processus d'oxydation. La combustion est donc un terme de la technique énergétique pour désigner la réaction de l'oxygène avec les composants inflammables des combustibles, lors de laquelle de l'énergie est dégagée. Les combustions se déroulent à des températures élevées (même supérieures à $1000\text{ }^{\circ}C$) et produisent un dégagement de chaleur. L'oxygène nécessaire est contenu dans l'air de combustion (ou air comburant) amène. En même temps, un volume considérable de gaz de combustion (fumées) ainsi qu'une certaine quantité de matières résiduelles (cendres, scories) se forment en fonction du type de combustible.

3.2 Réaction de combustion ;

Une combustion est une réaction chimique. Les réactifs sont le **combustible** (corps qui brûle) et le **comburant** (corps qui aide à brûler). Le comburant est généralement le dioxygène. Cette réaction s'accompagne toujours d'un dégagement de chaleur (réaction exothermique).

Combustible + comburant → produits de combustion + énergie thermique

OBS : seules sont considérées ici les combustions dont le dioxygène est le comburant. Les hydrocarbures et le charbon sont de très bons combustibles.

a. Combustion complète

Quand il y a assez de dioxygène (réactif en excès), la combustion d'une matière première est complète. Elle produit du dioxyde de carbone et de l'eau (avec les hydrocarbures).

b. Combustion incomplète

Quand il n'y a pas assez de dioxygène, la combustion est dite incomplète. Elle risque de former du monoxyde de carbone, du carbone ou les deux à la fois.

on note : le dioxygène de l'air est un comburant. Le diazote contenu dans l'air est un gaz inerte qui ne réagit ni n'intervient au cours de la réaction.

OBS : une combustion complète produit plus d'énergie (transférée sous forme de chaleur) qu'une combustion incomplète.

3.3 Qualité de la combustion:

Pour caractériser facilement la qualité de la combustion d'une installation, on mesure les taux γ CO₂ et γ O₂ dans les fumées, à l'aide d'un analyseur de fumées. Ensuite, le diagramme permet d'obtenir en fonction du γ CO₂ mesuré et du γ O₂ mesuré :

1. Le type de combustion réelle
2. Le % d'excès d'air ou de défaut d'air
3. Le γ CO (s'il y a lieu)

Il est défini pour un combustible donné, l'axe des abscisses représente le γ O₂ et celui des ordonnées représente le γ CO₂. Il comporte en général :

- La droite des combustions oxydantes (γ CO = 0%) graduée en excès d'air,
- Une graduation en défaut d'air sur l'axe vertical (γ O₂ 0%),
- Le point représentatif de la combustion neutre (γ O₂=0% et γ CO = 0%) pour γ CO_{2max},
- Les droites d'égale teneur en CO (γ CO = cte) parallèle à la droite des combustions oxydantes,
- Les droites d'égal excès ou défaut d'air

4. Les diagrammes d'OSTWALD

Les diagrammes d'OSTWALD sont applicables à tous les combustibles, ils sont insensibles aux teneurs en eau et en cendres des combustibles solides, mais ne sont plus utilisables si la teneur en imbrûlés solides dépasse 3%. Les diagrammes pratiques sont limités à leur partie utile (γ O₂ < 21%).

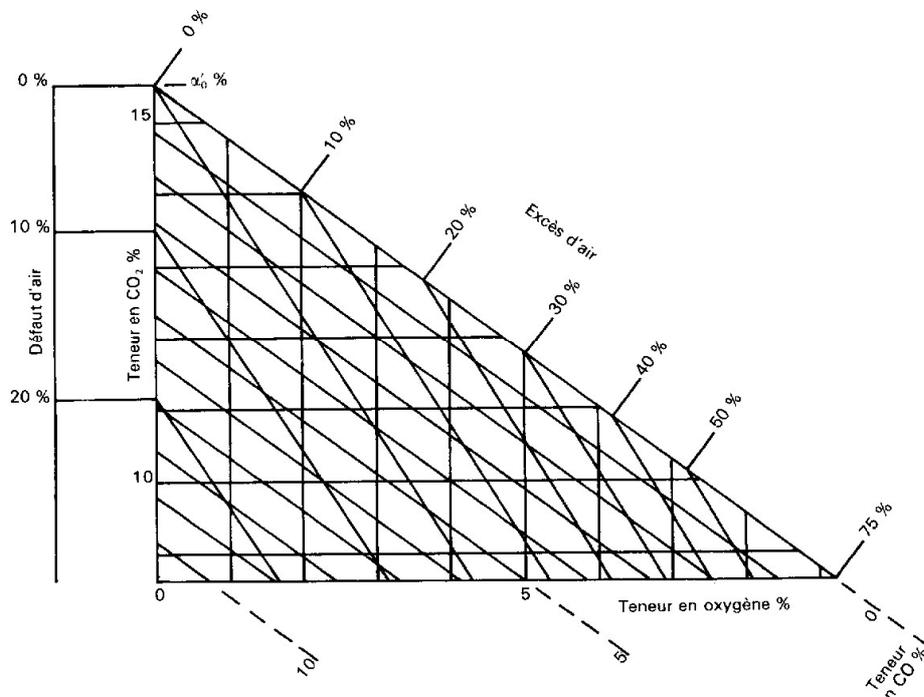


Figure 1 : Diagramme d'OSTWALD du FOD

Exemple : On mesure $\gamma \text{CO}_2 = 11\%$ et $\gamma \text{O}_2 = 6\%$

Sur le diagramme, on place le point, qui sur la diagonale supérieure : La combustion est donc complète, avec 38 % d'excès d'air, et 0% de CO

En fonction de la fiche technique du matériel de combustion, on peut ensuite modifier les réglages pour diminuer l'excès d'air.

4.1 Les Pouvoirs Calorifiques :

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète, sous la pression atmosphérique normale, de l'unité de combustible, celui-ci ainsi que les produits de combustion étant à 0 °C.

→ Notation : **PC**

→ Unité : **[kJ/kg(n) de combustible]** ou **[kJ/m³(n) de combustible]**

→ Remarque : **(n)** signifie que toutes les réactions se produisent dans les conditions normales de température et de pression.

Le pouvoir calorifique est dit *inférieur (PCI)* quand l'eau résultant de la combustion de l'hydrogène et des hydrocarbures est supposée à l'état de vapeur dans les produits de combustion.

Le pouvoir calorifique est *supérieur (PCS)* quand cette eau de combustion est ramenée à l'état liquide dans les fumées.

$$PCS - PCI = m_{H_2O} \cdot L_v$$

$L_v = 2500 \text{ kJ/kg}$ aux CNTP

Masse d'eau contenue dans les fumées

Elle dépend de la quantité d'hydrogène présente dans le combustible

Exemple : $m(\text{H}_2\text{O}) = 1,6 \text{ kg}$ dans les fumées pour la combustion de $1 \text{ m}^3(\text{n})$ de gaz naturel

Quelques PCI/PCS

Gaz naturel : PCI et PCS d'environ 10.2 kWh / m³(n) et 11.3 kWh / m³(n)

Fioul domestique : PCI et PCS d'environ 10 kWh / l(n) et 11 kWh / l(n)

4.2 La Combustion Reelle

4.2.1 Définition

La combustion stœchiométrique est la base des calculs théoriques en combustion. Les analyses réalisées ou les résultats fournis d'une combustion réelle, d'un combustible de composition connue, vont permettre de la définir précisément, par comparaison avec les résultats de la combustion neutre. Ainsi, par rapport à la théorie, on pourra définir :

- La combustion en excès d'air
- La combustion en défaut d'air

En pratique, c'est l'analyse des fumées sur site qui donnera les renseignements techniques nécessaires à la définition de la combustion réelle.

4.2.2 La combustion en excès d'air

On parlera de « combustion en excès d'air » chaque fois que l'on détectera la présence d'oxygène dans les produits de combustion. L'excès d'air peut résulter soit d'un réglage du volet d'air au niveau du brûleur (*brûleur à air soufflé*), soit d'une impossibilité à régler l'arrivée d'air (*brûleur atmosphérique*). Cet excès d'air est indispensable pour une combustion complète

L'air en excès impliquera :

- une augmentation des pertes par les fumées,
- une diminution du rendement de la chaudière.

Ainsi cette augmentation entraînera un accroissement des dépenses énergétiques sur une saison de chauffe (consommation de combustible plus importante), qui restent non négligeables même pour de petites puissances de chaudières.

On caractérise l'air en excès par le *facteur d'air Fa* ou *taux d'aération n* en utilisant la relation suivante :

$$n = \frac{\text{Volume d'air réellement admis au brûleur}}{\text{Volume d'air théorique}} \quad \text{soit} \quad n = \frac{V_a + V_{EA}}{V_a}$$

Avec : V_a : Pouvoir comburivore $[m^3_{(n)} \text{ d'air} / \text{unité de combustible}]$
VEA : Volume d'air en excès $[m^3_{(n)} \text{ d'air en excès} / \text{unité de combustible}]$

OBS : Généralement « n » est fourni par les relevés réalisés sur site à l'aide d'analyseurs de fumées.

$$VEA = V_a \times (n - 1)$$

Pourcentage d'excès d'air $EA\%$: $EA\% = (n-1)*100$

5. Température de combustion :

On distingue quatre températures de combustion :

- Température théorique
- Température potentielle ou température théorique avec excès d'air
- Température effective
- Température pratique ou température d'équilibre.

5.a- Température théorique

C'est la température que prendraient les produits d'une combustion si celle-ci était neutre, complète et athermane. La température théorique est donnée par la formule :

$$T_t = T + PCI / F.c$$

T : température ambiante

PCI : exprimé en kcal/kg

F : quantité de fumées en kg

c : chaleur spécifique en kcal/kg, degré Celsius avec en première approximation :

$$C = 0,24 + 3 \times 10^{-5} (t_p + T)$$

Avec t_p : température potentielle

Le tableau ci-dessous donne les températures théoriques de quelques gaz.

Nature	Température de combustion Pour air à 0° c
H ₂	2 000°c
CO	2 142°c
CH ₄	1 850°c
C ₂ H ₂	2 400°c

5.b Température potentielle :

C'est la température que prendraient les produits d'une combustion complète et athermane avec excès d'air. La température potentielle est donnée par la même formule que la température théorique avec la quantité de fumées F1 calculée en fonction de l'excès d'air, d'où :

$$T_t = T + PCI / F.c$$

Cette température caractérise l'excès d'air nécessité par les types de l'équipement de chauffe et de la chambre de combustion combinés pour brûler correctement le combustible considéré. Elle permet également de situer le niveau thermique des fumées dans les différentes zones d'échange et contribue pour une large part au dimensionnement de la zone de convection.

5.c Température effective de combustion

C'est la température que prendrait les produits d'une combustion complète et athermane avec excès d'air compte tenu de la chaleur absorbée par les dissociations qui se produisent dans les fumées

$$T_e = T + \frac{PCI - Qd}{F_{1c}}$$

Avec Qd = chaleur de dissociation.

Le calcul de te se fait par approximations successives en supposant au départ que te, ce qui permet de calculer Qd d'après la composition des fumées et les constantes d'équilibre chimique.

5.4 Température pratique de combustion :

La température pratique de combustion, appelée aussi température d'équilibre, est celle que l'on obtiendrait si la flamme était à une température uniforme. Si l'on pose :

$(1 - \alpha)$ = pertes par les imbrûlés & $(1 - \beta)$ = pertes par les parois

q = quantité de chaleur rayonnée sur les murs par kg ou m³ de combustible

t_{pr} = température pratique de combustion

$$\text{il vient : } \alpha\beta \text{ PCI} = q + F1 c (t_{pr} - T)$$

Si l'on pose :

p = quantité de combustible en kg ou en m³ brûlée en 1 heure

Q = flux de chaleur rayonnée par la flamme en kcal/h

$$\text{Il vient : } Q = pq$$

$$\text{Or on démontre que : } Q = \rho\mu S [(t_{pr} + 273)^4 - (t + 273)^4]$$

μ Facteur qui dépend de la forme du foyer ,coefficient de rayonnement mutuel qui dépend de la nature de la flamme et de la surface réceptrice S surface de la flamme t_{pr} température pratique de la combustion = température moyenne de la flamme t température de la surface réceptrice

6. Les équipements de combustion ;

- ✓ Chaudières
- ✓ Brûleurs
- ✓ Fours
- ✓ Échangeurs et récupérateurs de chaleur

7. Aspects environnementaux liés à la combustion.

Au cours des dernières années, les effets négatifs de la combustion sur l'environnement, notamment les émissions de gaz à effet de serre (GES), qui contribuent au réchauffement de la planète, ont beaucoup retenu l'attention. Le Protocole de Kyoto (1997) traite de cette question et le Canada, qui en est signataire, s'est engagé à réduire, entre 2008 et 2012, ces émissions de 6 p. 100 par rapport aux niveaux de 1990. Le changement climatique provoqué par le réchauffement de la planète représente l'un des plus grands défis que doivent relever non seulement le Canada mais le monde entier. Une meilleure gestion des procédés de combustion ainsi qu'une production et une consommation d'énergie plus efficaces sont deux des stratégies clés pour réduire les émissions atmosphériques. C'est donc pour cette raison que ce guide est publié en parallèle avec la politique du Canada en matière de changement climatique en tant qu'outil de mise en œuvre. Au Canada, la collaboration des propriétaires et des opérateurs d'équipement de combustion est indispensable pour atteindre l'objectif de réduction des émissions de GES et des pluies acides. Le présent guide ne décrit que brièvement les émissions; pour obtenir une liste de quelques émissions engendrées par les systèmes de combustion et de leurs effets, voir le tableau 2. Pour de plus amples renseignements à ce sujet, consulter le document intitulé *An Energy Efficiency and Environment Primer for Boilers and Heaters*.

tableau 2. émissions engendrées par les systèmes de combustion et leurs effets			
émission	source	effet	potentiel des ges liés au co ₂
co ₂ (gaz carbonique)	combustion complète du carbone contenu dans le combustible	réchauffement de la planète	1
co (monoxyde de carbone)	combustion incomplète du carbone contenu dans le combustible	smog	
so ₂ (dioxyde de soufre)	combustion du soufre contenu dans le combustible	smog, pluie acide	
no _x (oxydes d'azote)	sous-produit de la plupart des procédés de combustion	pluie acide	
n ₂ o (oxyde nitreux)	sous-produit de certains procédés de combustion	réchauffement de la planète	310
cov (composés organiques volatils)	fuite et évaporation de combustibles liquides (engendres p. ex. par les véhicules, les réservoirs de carburant, les pompes à carburant, les raffineries et les solvants des peintures)	smog	
ch ₄ (méthane)	composé principal du gaz naturel; fuite des puits de gaz, des canalisations et des réseaux de distribution	réchauffement de la planète	21
h ₂ o (vapeur d'eau)	combustion de l'hydrogène contenu dans le combustible	brouillard localisé	
particules (poussière, suie,	carbone et hydrocarbures non brûlés ou brûlés partiellement; cendres et saletés contenues dans	smog	

fumées	le combustible		
éléments traces	impuretés dans le combustible	agents carcinogènes potentiels	
composés halogènes	composés de combustible ou d'air comburant contenant des halogènes (chlore, fluor, brome et iode)	agents carcinogènes potentiels, réchauffement de la planète	jusqu'à 24 000

tableau 3. directives du ccme* sur les émissions de no_x pour les systèmes de chauffage neufs		
capacité d'alimentation	limite d'émission de no _x , g/gj** et ppm (à 3 % o ₂)***	
	10,5 à 105 gj/h (10 à 100 millions btu/h)	supérieure à 105 gj/h (>100 millions btu/h)
gaz naturel	26 (49,6)	40 (76,3)
mazout distille	40 (72,3)	50 (90,4)
huiles résiduelles contenant moins de 0,35 % d'azote	90 (162,7)	90 (162,7)
huiles résiduelles contenant au moins 0,35 % d'azote	110 (198,9)	125 (226,0)
* le conseil canadien des ministres de l'environnement		
** g/gj = grammes de no _x emis par giga joule d'alimentation en combustible		
*** = parties par million par volume, corrigées à 3 % o ₂ dans les gaz de carneau (10 000 ppm = 1 %)		

Pour corriger les ppm de NO_x à 3 % O₂ : NO_x à 3 % O₂ = [NO_x mesuré x 17,9] ÷ [20,9 - O₂], où O₂ est l'oxygène mesuré dans les gaz de carneau, base sèche

Pour convertir les ppm NO_x à 3 % O₂ à g/GJ : pour le gaz naturel, g/GJ = ppm ÷ 1,907; pour le mazout, g/GJ = ppm ÷ 1,808

tableau 4. émissions courantes de no_x sans équipement de contrôle de no_x		
type de combustible et de chaudière	émissions courantes de no _x (ppm à 3 % o ₂)	
gaz naturel	tube de fumée	75-115
	tube d'eau préfabriqué	40-90
	tube d'eau sur le site	45-105
huile n_o 2	tube de fumées	70-140
	tube d'eau préfabriqué	90-150
	tube d'eau sur le site	40-115
huile n_o 4	tube d'eau préfabriqué	160-310
	tube d'eau sur le site	140-190
huile n_o 6	tube d'eau préfabriqué	200-360
	tube d'eau sur le site	190-330

Bien que les autres GES, installation pour installation, aient des effets plus puissants que le CO₂, ce dernier demeure le gaz à effet de serre le plus important en raison de son volume. En 1997, il représentait les trois quarts des émissions totales du Canada. La plus grande partie des émissions de CO₂ sont générées par la consommation de combustibles à des fins domestiques, industrielles, de transport ou de production d'électricité. C'est pour cette

raison que l'application de mesures d'efficacité énergétique visant la diminution de la consommation de combustibles est essentielle pour réduire les émissions de CO₂.

Les consommateurs de combustibles doivent relever deux défis. L'un est d'ordre économique : obtenir le meilleur rapport qualité-prix; l'autre concerne l'environnement : maintenir les émissions faibles, c'est-à-dire du moins dans les limites prescrites par les règlements. Heureusement, les éléments qui favorisent le premier objectif s'appliquent également au second.

On autorise des limites moins sévères pour l'équipement dont l'efficacité supérieure à la normale a été démontrée et qui, par conséquent, consomme moins de combustible. Les provinces et les territoires sont responsables de la mise en application des limites et peuvent en imposer de plus strictes. Ils ont également la responsabilité de déterminer dans quelle mesure les directives s'appliquent aux systèmes de chauffage modifiés ou remis en état.

Les émissions de dioxyde de soufre (SO₂) et d'oxydes d'azote (NO_x) contribuent aux pluies acides et par conséquent, posent également un problème. Le contrôle des émissions de SO₂ s'effectue en limitant la concentration en soufre admise dans le combustible, mais la réduction des émissions de NO_x est possible en modifiant le processus de combustion. On peut trouver les directives concernant les systèmes de chauffage neufs dans le tableau 3, et une description des stratégies permettant de respecter les règlements relatifs aux émissions de NO_x dans le document intitulé *An Energy Efficiency and Environmental Primer for Boilers and Heaters*.

Chapitre 3.

LES FOURS INDUSTRIELS

3.1 Définition:

Un four est une enceinte maçonnée ou un appareil, mené d'un système de chauffage puissant, qui transforme, par la chaleur, les produits et les objets. En cuisine, il permet de cuire des aliments. Dans un processus de production d'objet, le four permet de réaliser le traitement d'objets par la chaleur : poteries, céramiques, verres, métaux...

Un four est un outil utilisé pour élever la température à une limite déterminée, afin de transformer un produit. Il peut être :

* Un équipement destiné uniquement au chauffage (exemple : réchauffage de l'acier avant déformation plastique, réchauffage de pétrole brut avant distillation) ;

* Un véritable réacteur dans lequel on élabore les produits (exemple : four de fusion, de verre, four de vapocraquage de la pétrochimie).

3.2 Classification et description des fours industriels.

Toute classification est arbitraire, elle est toutefois utile dans la mesure où elle permet de retrouver des caractéristiques communes à des équipements, à la première vue, très différents. Nous proposons ici quatre classifications, en fonction:

*De la manutention du produit : fours continus ou discontinus.

*Du procédé de chauffage : direct ou indirect.

*Du niveau de température.

*Du combustible.

3.3 Bilan énergétique d'un four :

3.3.1 Rendement d'un four :

La notion du rendement d'un four apparaît par le fait que le débit de chaleur libérée aux brûleurs par la combustion n'est pas intégralement transmis au fluide procédé. On constate en effet des pertes thermiques qui ont essentiellement deux origines :

- les pertes par parois du four sont dues aux imperfections de l'isolation thermique par les matériaux réfractaires. Dans le cas des fours récents de grande puissance thermique elles représentent 1 à 2% de chaleur libérée aux brûleurs. Elles peuvent être beaucoup plus importantes dans le cas de fours anciens dont le réfractaire est défectueux.
- les pertes par les fumées qui évacuent à l'atmosphère un débit de chaleur relativement important représentant en général entre 5 et 20% de celui qui est libérée aux brûleurs.

Le bilan thermique du four s'exprime :

$$Q_{\text{entrées}} = Q_{\text{absorbée}} + Q_{\text{fumées}} + Q_{\text{parois}}$$

Le rendement d'un four η est défini comme le rapport du débit de chaleur absorbé par le fluide procédé au débit de chaleur fourni au four par la combustion ($Q_{\text{entrées}}$).

$$\text{rendement (\%)} = \eta = \frac{Q_{\text{absorbée}}}{Q_{\text{entrées}}} \times 100$$

En utilisant le bilan thermique du four, le débit de chaleur absorbée peut encore s'exprimer :

$$Q_{\text{absorbée}} = Q_{\text{entrées}} - Q_{\text{fumées}} - Q_{\text{parois}}$$

$$\text{L'expression du rendement devient : } = \frac{Q_{\text{entrées}} - Q_{\text{fumées}} - Q_{\text{parois}}}{Q_{\text{entrées}}} \times 100$$

$$\eta(\%) = 100\% - \% \text{ pertes fumées} - \% \text{ pertes parois}$$

Calcul du rendement :

Calcul du rendement d'un four à pulvérisation mécanique sans vapeur :

Chaleur emportée par les fumées :

Poids des fumées de fuel :

$$P_{\text{fumée F}} = \left[1 + (1 + e) \frac{137,5 + 412H/C}{12 + 12H/C} \right] CF$$

Poids des fumées de gaz :

$$P_{\text{fumée G}} = \left[1 + (1 + e) \left(\frac{1,36}{dG} + 14,75 \right) \right] CG$$

Chaleur emportée par les fumées QF

$$QF = (P_{\text{fumée G}} + P_{\text{fumée F}}) C_p \Delta T$$

C_p : chaleur sensible des fumées

Chaleur emportée par le fluide à chauffée Qs :

$$QS = m C_p \Delta T$$

m : débit du fluide

C_p : chaleur sensible du fluide

ΔT : différence de température entre l'entrée et sortie de four

Chaleur de vapeur emportée dans les fumées Qve

$$QVE = i \times CF \frac{7,77 TF + 1,38 \cdot 10^{-3} TF^2}{18}$$

Pour l'air :

Poids d'air nécessaire à la combustion du fuel en T/j :

$$\mathbf{PAF = CF (1 + e) \frac{137,5 + 412 H/C}{12 + 12 H/C}}$$

Poids d'air nécessaire à la combustion du gaz en T/j :

$$\mathbf{PAG = CG (1 + e) \left(\frac{1,36}{dG} + 14,75 \right)}$$

Calcul de la chaleur entrante Qc

▪chaleur sensible entrante du combustible Qc :

$$\mathbf{Qc = (CF \times 0,5 TF) + (CG \times 0,5 TG)}$$

▪chaleur sensible entrante de l'air Qa :

$$\mathbf{QA_F = PAF \frac{32,46 TA + 4,048 \cdot 10^{-3} TA^2 - 4,058 \cdot 10^{-7} TA^3}{137,5}}$$

$$\mathbf{QA_G = PAG \frac{32,46 TA + 4,048 \cdot 10^{-3} TA^2 - 4,058 \cdot 10^{-7} TA^3}{137,5}}$$

Alors :

$$\mathbf{QA = QA_G + QA_F}$$

Chaleur libérée par le combustible QL :

$$\mathbf{QL_F = CP \times PCI_F}$$

$$\mathbf{QL_G = CP \times PCI_G}$$

Chaleur sensible entrante de la vapeur d'atomisation Q_v :

Poids de vapeur d'atomisation = $i * CF$

On prend en général $i=0,35$

$$QV = i \times CF \frac{7,77 TV + 1,38 \cdot 10^{-3} TV^2}{18}$$

Tv : température de vapeur

$$QE = QC + QA + QL + QV$$

Rendement :

$$\text{rendement brut} = \eta = \frac{Q_{\text{absorbée}}}{QE} \times 100 = 78,86\%$$

Paramètres dont dépend le rendement d'un four :

Le pourcentage de pertes par les fumées dépend de deux paramètres :

- L'excès d'air de combustion.
- La température de rejet des fumées.

Possibilités et limites à l'amélioration du rendement d'un four :

L'expression indirecte du rendement montre que celui-ci est affecté par des pertes de deux natures :

- Pertes aux fumées.
- Pertes aux parois.

L'amélioration du rendement repose sur la réduction de ces pertes.

Bibliographie:

* *Georges Monnot ; "La Combustion dans les fours et les chaudières", , Editions TECHNIP, 1978*

* *Markus HAIDER, Philippe SEGUIN, "Chaudières. Systèmes de combustion, circuits eau/vapeur et air/fumées", Techniques de l'ingénieur, BE 8 731, octobre 2012*

**Analyse de combustion industrielle, Directive pour les mesures d'émissions et de processus, 3e édition révisée, Testo SE & Co. KGaA, en janvier 2018*

**les produits de combustion, disponible sur le site web, 'https://www.maxicours.com/se/cours/les-produits-de-combustion/', le 25/02/2020*

**répercussions de la combustion sur l'environnement, disponible sur le web:' https://www.rncan.gc.ca/energie/publications/efficacite/industrie/peeic/6696' le 25/02/2020*

**BOUBAAYA Hassen ; KHAREF Hocine," Caractérisation des paramètres de combustion d'un four industriel :cas de cimenterie de Hammam Dhalaa à M'sila",mémoire master, énergétique, université de M'sila 2017*

* *El Airaj Hind , Marmouch El Moukhtar, « Etude et optimisation du rendement du four » , MST de Génie Industriel, Faculté des Sciences et Techniques de Fès, université de Fès, Maroc Juin 2012*