

Fours & Chaudières

SUPPORT DU COURS

**Niveau 1^{ère} Année Master en
génie chimique**

Enseignant : Dr. SAKRI ADEL

UNIVERSITE DE BISKRA

ANNEE UNIVERSITAIRE 2019/2020

Sommaire

Chapitre 1. Généralités

I- INTRODUCTION	1
2. Energie.....	1
3. Installations de combustion.....	3
4. Le processus de combustion.....	4

Chapitre 2. COMBUSTIBLES ET ENERGIE DE COMBUSTION

1. Les combustibles	5
1.1 Définition:.....	5
2. La combustion des combustibles.....	5
2.1 Combustibles solides.....	5
2.2 Combustibles gazeux.....	6
2.3 Combustibles liquides.....	8
3. Energie de combustion.....	8
3.1 La combustion.....	8
3.1.1 Définition.....	8
3.2 Réaction de combustion	9
a. Combustion complète	9
b. Combustion incomplète	9
3.3 Qualité de la combustion.....	10
4. Les diagrammes d'OSTWALD.....	10
4.1 Les Pouvoirs Calorifiques	11
4.2 La Combustion Reelle.....	12
4.2.1 Définition.....	12
4.2.2 La combustion en excès d'air.....	12
5. Température de combustion	13
5.a- <i>Température théorique</i>	13
5. b <i>Température potentielle</i>	14
5. c <i>Température effective de combustion</i>	14
5.4 <i>Température pratique de combustion</i>	15
6. Les équipements de combustion	16
7. Aspects environnementaux liés à la combustion.....	16

Chapitre 3. LES FOURS INDUSTRIELS

3.1 Définition.....	19
3.2 Classification et description des fours industriels.	19
3.3 Fours continus et fours discontinus.....	20
3.4 Chauffage direct et chauffage indirect.....	21
*Fours à chauffage direct.....	21
*Fours à chauffage indirect.....	22
3.5 Fours à haute et fours à basse température.....	23
3.6 Fours à haute température.....	23
3.7 Fours à basse température.....	24
3.8 Bilan énergétique d'un four	25
3.8.1 Rendement d'un four	25
3.2 Problème de dimensionnement des fours.....	27

Chapitre 4. LES CHAUDIERES INDUSTRIELLES

1. Définition	28
---------------------	----

2. Rôle des chaudières industrielles	28
3. Aspect thermodynamique des chaudières	29
3.1. Diagramme thermodynamique	29
3.2. Diagramme entropique.....	30
3.3. Cycle de Rankine/Hirn.....	31
4.3. Différents types de chaudières.....	34
1- Chaudières à tubes d'eau.....	34
2- Chaudières à tubes de fumés.....	37
3- Chaudières de récupération.....	38
c- Types de chaudières de récupération.....	39
4. Circulation de l'eau dans les chaudières	40
1. Modes de circulation.....	41
5. Calcul thermique d'une chaudière.....	42
2.3. Rendement global.....	46
6. Principaux paramètres à surveiller lors d'exploitation d'une chaudière (Facteurs affectant le rendement)	46
Bibliographie	47

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.

2. Energie

(Du grec) signifie force en action et est définie comme la capacité d'une matière, d'un corps ou d'un système à 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.

3. 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.).

4. 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 épuré (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.

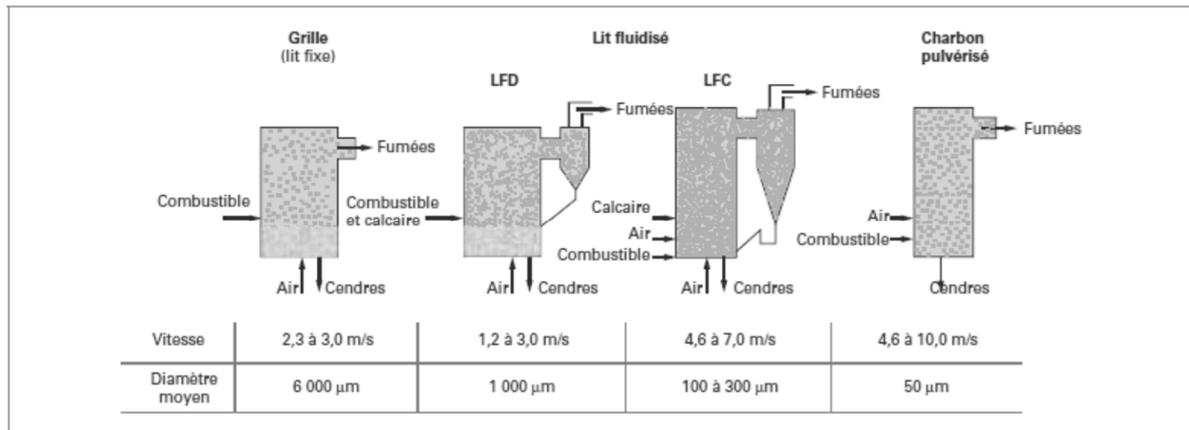


Fig.1 le système de combustion d'un combustible solide

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**) 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) .

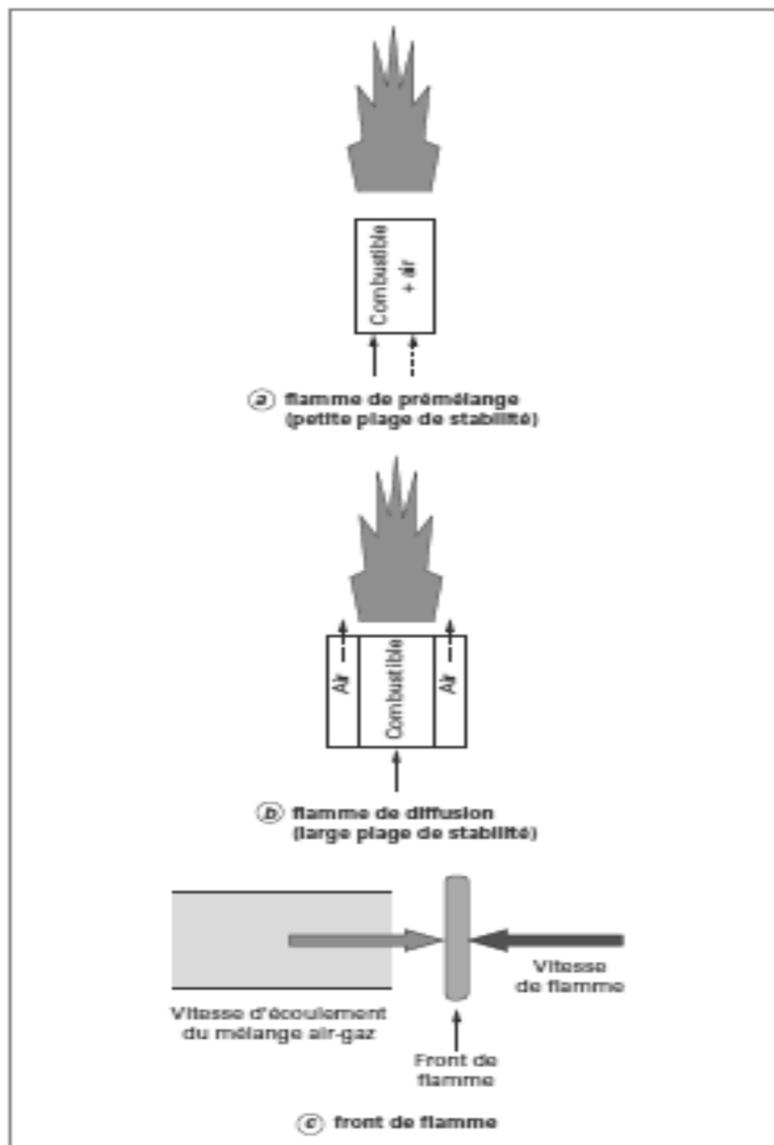


Fig. 2 Brûleurs à gaz

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/Nm³) 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 °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

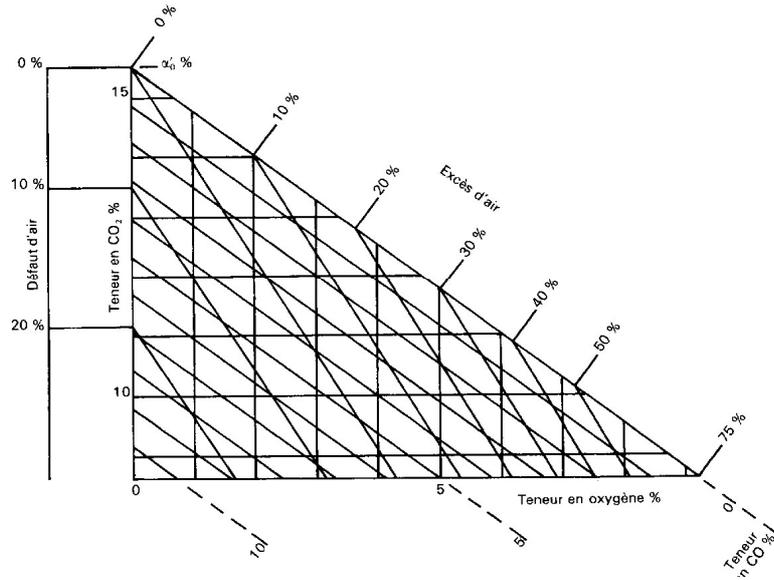
Quand il y a assez de dioxygène (réactif en excès), la combustion d'une matière première est complète. Elle produit du dioxyde de carbone et de l'eau (avec les hydrocarbures).

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 O₂0%),
- 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'égale 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%).

Fig. 3 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 m³(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 :

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

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

VEA : Volume d'air en excès $[m^3_{(n)}$ d'air en excès / 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 prendraient 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 co2
co₂ (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	
so₂ (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	
n₂o (oxyde nitreux)	sous-produit de certains procédés de combustion	réchauffement de la planète	310
cov (composés organiques volatils)	fuite et évaporation de combustibles liquides (engendrés p. ex. par les véhicules, les réservoirs de carburant, les pompes à carburant, les raffineries et les solvants des peintures)	smog	
ch₄ (méthane)	composé principal du gaz naturel; fuite des puits de gaz, des canalisations et des réseaux de distribution	réchauffement de la planète	21
h₂o (vapeur d'eau)	combustion de l'hydrogène contenu dans le combustible	brouillard localisé	
particules (poussière, suie, fumées)	carbone et hydrocarbures non brûlés ou brûlés partiellement; cendres et saletés contenues dans le combustible	smog	
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 (a 3 % o₂)***	
	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 a 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 % o₂)
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, cette dernière 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 Fours continus et fours discontinus

C'est la manutention et la circulation du produit qui est ici le critère. Dans un **four continu**, le produit à chauffer entre à une des extrémités et en ressort à l'autre. C'est le cas :

— des fours de réchauffage de semi-produits (fours à longerons et fours poussant) de la sidérurgie ;

— des fours de l'industrie chimique et du raffinage ;

— des fours rotatifs de l'industrie cimentière.

Dans un **four discontinu**, le produit à chauffer est immobile dans le four ; il est chargé et déchargé (enfourné et défourné) au même endroit. C'est le cas :

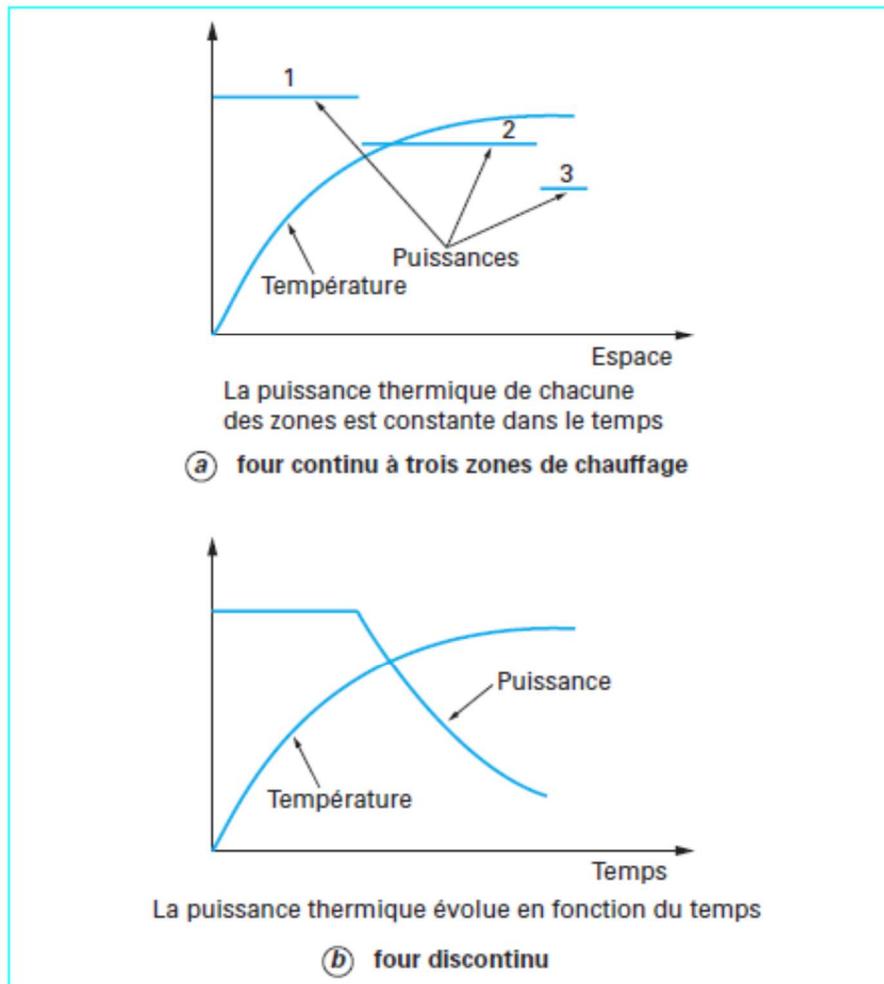
— des fours à sole mobile de forge ;

— des fours à soles fixes de traitement thermique ;

— des fours à cloches mobiles et élévateurs.

Cette différence dans la manutention entraîne des différences notables du point de vue thermique.

Dans un four continu, un point du four sera toujours (ou à peu près) à la même température ; dans un four discontinu la température en un point donné du four évoluera en fonction du cycle de chauffage que l'on veut faire subir au produit (la figure suivante).



3.4 Chauffage direct et chauffage indirect

Le critère est ici le contact entre le produit et les gaz issus de la combustion.

➤ Fours à chauffage direct

Il y a contact entre les gaz issus de la combustion et les produits à chauffer. Du point de vue thermique, cela entraîne qu'une partie du transfert de chaleur s'effectue par **convection**. Cette dernière provoque des phénomènes à la surface du produit qui peut lui être préjudiciables.

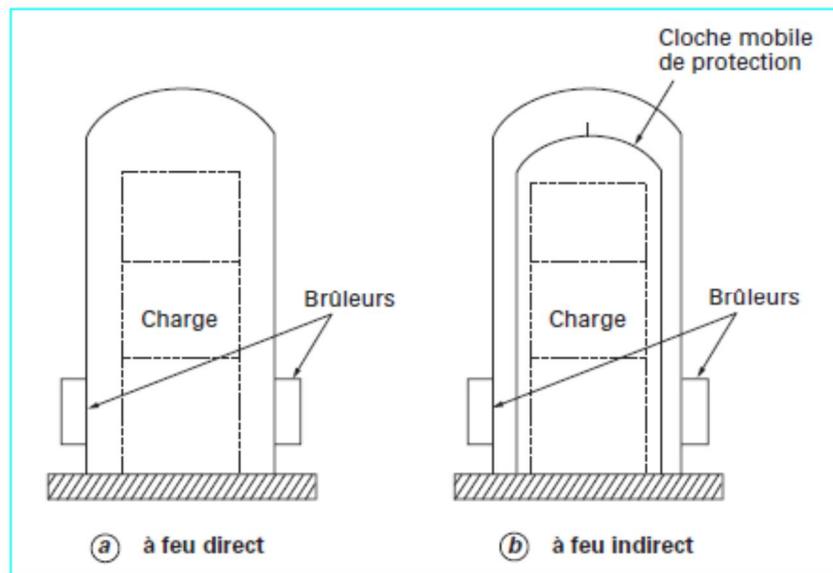
On notera que l'amélioration des performances des procédés continus et l'augmentation des capacités de production des installations ont peu à peu repoussé le domaine d'utilisation des fours discontinus que l'on trouve surtout pour :

- les produits demandant un temps de séjour en four très long ;
- les produits nécessitant des cycles de chauffage et ou de refroidissement très précis.

C'est ainsi que les **fours pits** ont quasiment disparus des procédés sidérurgiques et que les fours à cloches mobiles ont été supplantés par les lignes de traitement continus pour les bandes métalliques.

Exemple :

- décarburation et oxydation dans les fours de réchauffage de métaux ;
- interaction entre le soufre du combustible et le clinker dans les fours de cimenterie ;
- action des impuretés du combustible sur les bains des fours de verrerie. Pour éviter ce contact, on place parfois, entre les produits et les gaz un écran protecteur : le chauffage est alors indirect (voir la figure suivante).



➤ **Fours à chauffage indirect**

L'interaction entre les gaz de combustion et les produits n'existe plus. Par contre, il s'introduit une résistance supplémentaire au transfert de chaleur qui doit se faire par **conduction** au travers de la paroi protectrice, puis par **rayonnement** et éventuellement **convection** vers la charge. Le problème technologique est alors la tenue de cette paroi qui est portée à haute température et est au contact de la flamme et/ou des gaz à haute température. C'est le cas des fours à cloche mobile, des fours à moufle et des fours équipés de brûleurs à tubes radiants.

3.5 Fours à haute et fours à basse température

La classification est ici plus arbitraire car une même température peut être considérée comme haute dans un type d'activité et basse dans une autre activité.

Exemple : une température de 700 °C sera considérée comme haute dans l'industrie chimique et basse en sidérurgie ou dans l'industrie du verre. Même si cette limite est un tant soit peu arbitraire, elle n'en est pas moins réelle. D'un point de vue technologique, au-dessus de 700 °C à 800 °C, il devient délicat de construire des fours à chauffage indirect.

D'un point de vue thermique :

— au-dessus de 1 000 °C, le transfert de chaleur se fait essentiellement par **rayonnement** ;

— au-dessous de 700 °C, la part de la **convection** devient non négligeable et on cherchera à l'améliorer par mise en circulation des gaz autour du produit.

3.6 Fours à haute température

Ce sont les fours de sidérurgie, de verrerie, de cimenterie. La température que l'on veut obtenir sur le produit dépasse, et parfois nettement, 1 200 °C. C'est également le cas d'un certain nombre de fours de l'industrie du pétrole et de la chimie dans lesquels, bien que la température du produit soit inférieure à 500 °C, une partie importante de la chaleur est fournie directement par le rayonnement de la flamme dans une zone de radiation. Le transfert de chaleur s'y fait essentiellement par **rayonnement** de la flamme et des gaz issus de la combustion. Les transferts de chaleur par rayonnement découlent fondamentalement de la **loi de Stefan-Boltzmann** :

$$\dot{Q} = a\sigma S (T_f^4 - T_c^4)$$

avec Q : puissance thermique

Et de considérations géométriques liées aux dimensions et aux positions respectives des surfaces réceptrices de la chaleur (le produit à chauffer), des surfaces et volumes des émetteurs (flammes et gaz de combustion) et des surfaces réfléchissantes (parois du four). La **convection** jouera dans ces fours un rôle secondaire pour ce qui concerne la quantité de chaleur transférée, mais aura, dans un certain nombre de cas, un impact non négligeable sur l'égalisation des températures.

3.7 Fours à basse température

Ce sont, en particulier, les fours de traitement thermique de métallurgie, les fours de revêtement de surface et les fours pour les métaux non ferreux. La température que l'on veut obtenir sur le produit dépasse rarement 700 °C, et est parfois sensiblement inférieure.

C'est également le cas des zones de convection des fours de l'industrie du pétrole et de la chimie. Le transfert de chaleur s'y fait essentiellement par **convection** de gaz transparents. La loi fondamentale du transfert de chaleur est la loi de Newton :

$$\dot{Q} = kS (T_f - T_c)$$

et on cherchera, pour un écart de température ($T_f - T_c$) donné, à augmenter le transfert de chaleur en améliorant le **coefficient de convection** k qui s'écrit d'une façon générale :

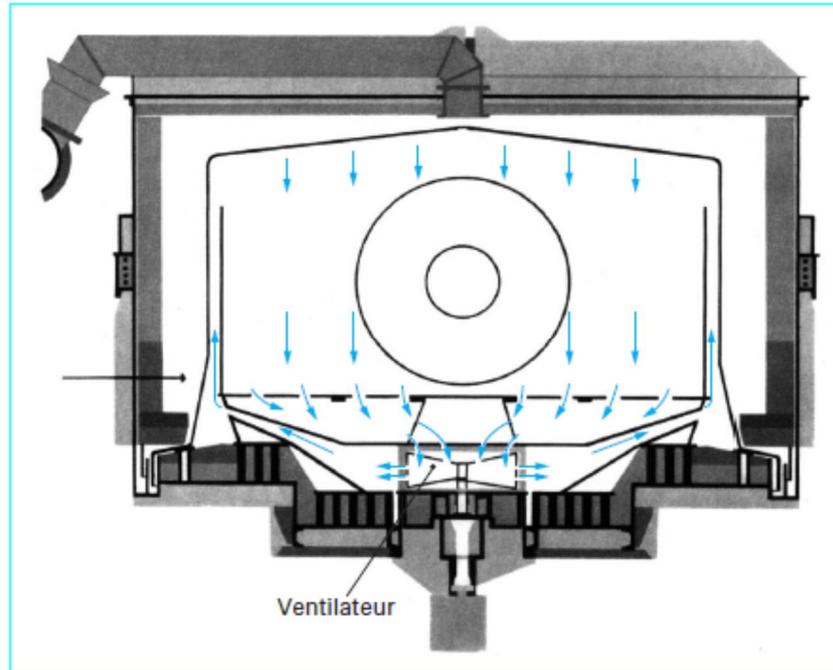
$$k = A \frac{\lambda}{\ell} Re^{0,8} Pr^{0,33}$$

Pr (nombre de Prandlt) dépend essentiellement du fluide : ici les gaz de combustion. On voit qu'il faudra pour obtenir un coefficient d'échange k élevé, essayer d'augmenter la valeur de Re (nombre de Reynolds).

Cela se fera :

— soit par **mise en vitesse du fluide** : implantation de ventilateurs à l'intérieur de l'enceinte (figure 3), utilisation de brûleurs à grande vitesse d'éjection des gaz de combustion dans le foyer (voir la figure suivante), recyclage externe des gaz ;

— soit par **augmentation des effets de pointe**, comme l'adjonction d'ailettes ou de picots (studs) dans les zones de convection des fours tubulaires, qui accroissent simultanément la surface d'échange.



3.8 Bilan énergétique d'un four :

3.8.1 Rendement d'un four :

La notion du rendement d'un four apparait 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 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 :

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

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

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

- **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.

3.2 Problème de dimensionnement des fours

C'est le point le plus intéressant pour les concepteurs. Les calculs de dimensionnement sont particuliers pour chaque type de four. Le problème est la résolution simultanément des relations suivantes.

- **Loi de Stefan-Boltzman** (pour les échanges par **rayonnement** entre le four et la charge):

$$Q_r = \int a \sigma S (T_f^4 - T_c^4) dt$$

- **Loi de Newton** (pour les échanges par **convection** entre le four et la charge):

$$Q_c = \int k S (T_f - T_c) dt$$

- **Equation de Fourier** (pour les échanges par **conduction** au sein des produits) :

$$\partial T / \partial t = \lambda / c_p \rho (\nabla T)$$

Actuellement, on utilise des programmes de calcul (des méthodes numériques) et des simplifications adaptées pour chaque type de four, basant sur les données suivantes :

- flux thermiques acceptables ;
- temps de séjour nécessaire à l'égalisation des températures ;
- chaleur utile ;
- rendement de combustion ;
- pertes diverses ; etc.

On détermine de cette façon le **temps de séjour du produit dans le four** et, en fonction de la production souhaitée, les dimensions du four.

Chapitre 4.

LES CHAUDIERES INDUSTRIELLES

1. Définition :

Une chaudière est une enceinte fermée qui sert à transformer l'eau traitée en vapeur sous l'action de la chaleur fournie par la combustion. La production de la vapeur est obtenue par l'échange de l'énergie calorifique fournie par la combustion et l'eau.

La plage de fonctionnement d'une chaudière est définie en fonction des paramètres de l'installation. Souvent, plusieurs chaudières sont utilisées pour répondre aux fortes demandes quand des variations de charge existent.

2. Rôle des chaudières industrielles.

Le **rôle d'une chaudière** est essentiellement de transmettre de l'énergie apparaissant sous forme de chaleur (avec ou sans combustion) à **de l'eau** sous pression pour obtenir soit de l'eau surchauffée sous pression, soit de la vapeur ou un fluide à l'état supercritique devenant de la vapeur par détente. De plus, les chaudières à vapeur de grande puissance sont en général associées à une turbine à vapeur pour produire de l'énergie électrique.

Sont exclues de cet article les chaudières traitant d'un fluide différent de l'eau telles que chaudières à sodium, à mercure, à sel fondu, à fluide organique, etc.

On distingue 5 catégories de chaudières, à **gaz**, au **fioul**, à **bois**, **électriques** ou les chaudières **mixtes** qui associent deux énergies. Elle peut aussi relever de différentes technologies, classiques, à basse température ou à condensation.

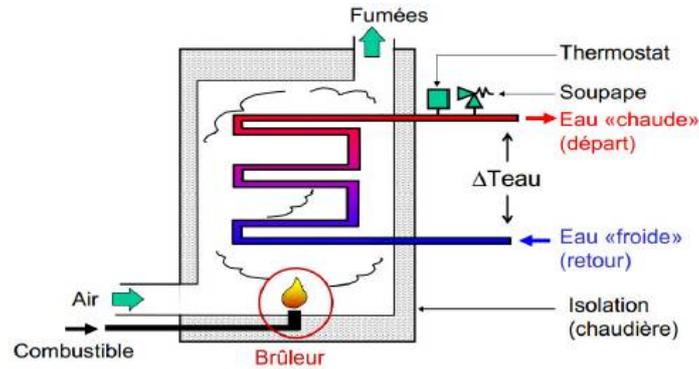


Figure 1. Rôle de la chaudière

3. Aspect thermodynamique des chaudières.

La base essentielle pour l'étude du transfert thermique lors de l'ébullition est la thermodynamique de changement de phase. Dans la pratique, on considère que le système est à l'équilibre thermodynamique quand la température du système est uniforme.

3.1. Diagramme thermodynamique

Le terme **diagrammes thermodynamiques** Il fait référence à un diagramme (Généralement en 2 ou 3 dimensions), dans laquelle en tant que Les coordonnées apparaître des quantités thermodynamiques (par exemple température, pression, volume, enthalpie, énergie libre).

L'analyse du transfert thermique en changement de phase entre liquide et vapeur dans la conception d'une chaudière ou d'un condenseur exige une compréhension du principe d'équilibre des deux phases. Pour faciliter la compréhension, nous avons présenté brièvement les aspects généraux de l'équilibre vapeur-liquide d'une substance pure.

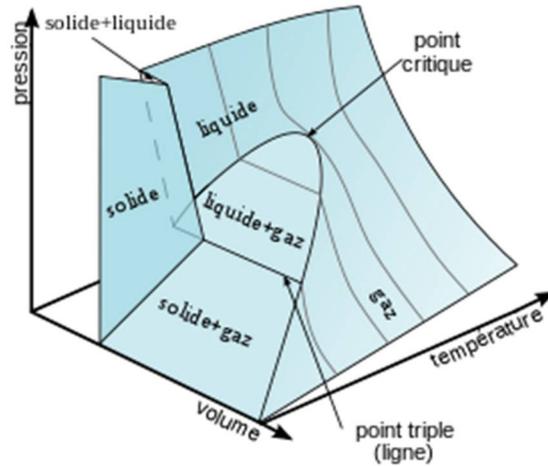


Figure 2. Schéma d'état p-V-T, représentatif de tous les états thermodynamiques d'un système à un composant.

3.2. Diagramme entropique

Ce diagramme est utilisé principalement pour l'étude des cycles de machines à vapeur. C'est une représentation graphique de toutes les évolutions qu'un fluide peut subir. Ce diagramme est Organisé de la manière suivante :

- Sur l'axe des abscisses, on trouve l'entropie massique S exprimée en $\text{KJ/Kg} \cdot \text{K}$
- Sur l'axe des ordonnées, on trouve la température T exprimée en $^{\circ}\text{C}$
- Ce diagramme est divisé en trois zones par une courbe dite courbe de saturation au sommet de laquelle se trouve un point critique qui sépare la partie du liquide saturé de celle de la vapeur saturée :
 - ✓ La partie liquide sous refroidi se trouve à gauche de la courbe d'ébullition
 - ✓ La zone à l'intérieur de la courbe de saturation correspond à la phase de Changement d'état (mélange liquide-vapeur).
 - ✓ L'espace vapeur se trouve à droite de la courbe de rosée

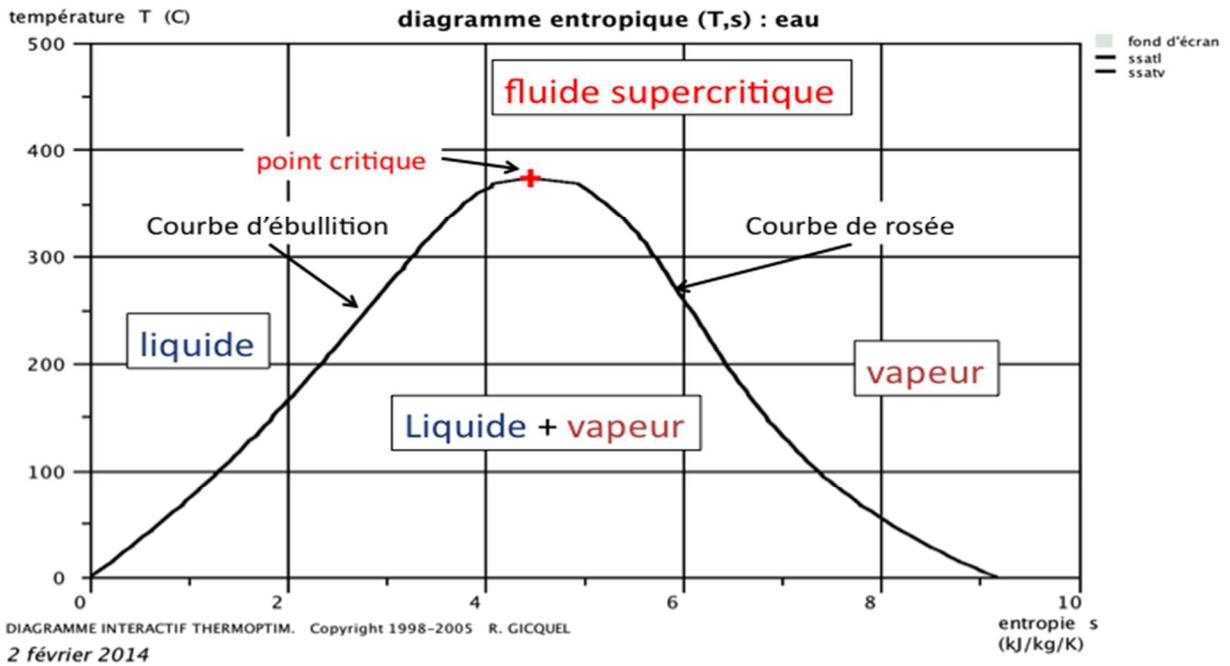


Figure 3. Diagramme TS courbes équilibre (Renaud Gicquel, Mines de Paris - Kevin Huynen)

3.3. Cycle de Rankine/Hirn

Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique moteur qui convertit la chaleur en travail mécanique. C'est le cycle thermodynamique le plus utilisé pour la génération d'électricité.

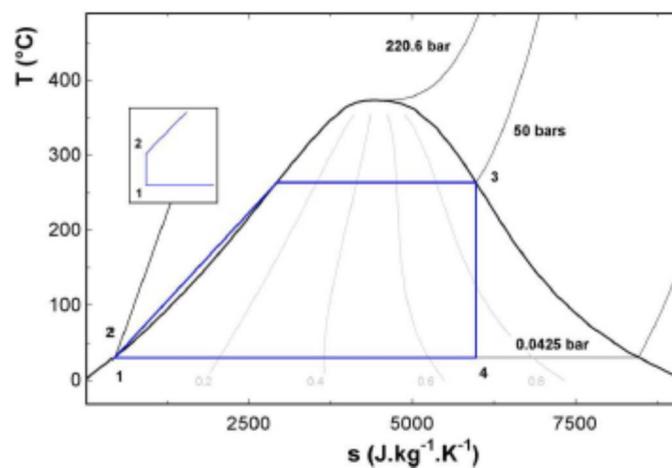


Figure 4. Cycle idéal de Rankine dans le diagramme T-S de l'eau

Le cycle idéal de Rankine/Hirn se réfère à la configuration simple du cycle de Rankine fonctionnant avec des composants sans irréversibilités à laquelle une étape de surchauffe de la vapeur est ajoutée.

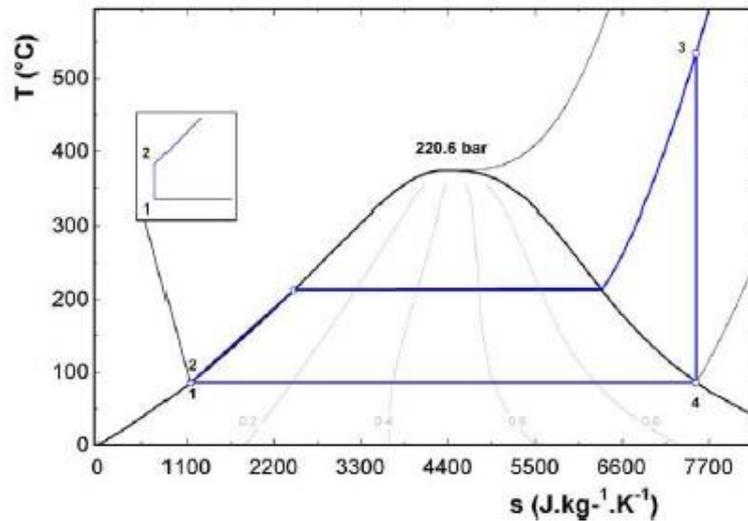


Figure 5. Cycle idéal de Hirn (Rankine/Hirn) dans le diagramme T-s de l'eau

Pour la Chaudière

$$Q_h = h_3 - h_2$$

Le cycle réel de Rankine diffère de cycle idéal en raison des irréversibilités dans les composants du cycle. Nous illustrons sur la figure 6 les irréversibilités et les pertes sont présentées avec les quatre sous-systèmes du cycle de Rankine:

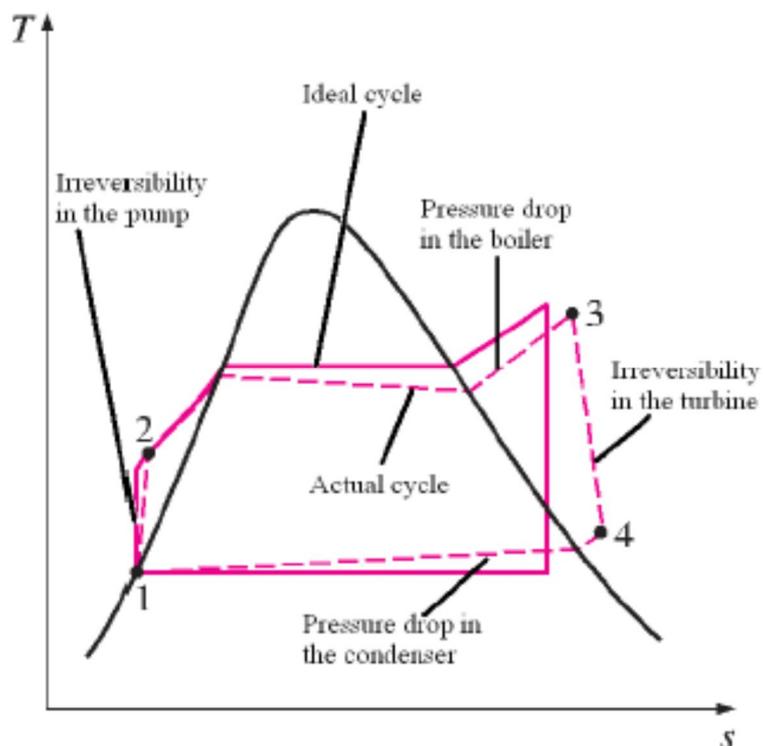


Figure 6. Ecart entre le cycle à vapeur réel et le cycle de Rankine idéal

- *Irréversibilité dans la pompe*
- *Irréversibilité dans la turbine*
- *Frottement du fluide de travail*
- *Et ...Irréversibilités liées aux transferts de chaleur dans la chaudière et le condenseur.*
Dans la situation idéale, les sources et puits de chaleur sont supposées être, au niveau de la chaudière et du condenseur, à des températures identiques aux températures du fluide qui traverse le cycle. Dans la situation réelle, les différences de température doivent exister afin de permettre les transferts de chaleur. Ces différences de température sont synonymes de créations d'entropie et donc d'irréversibilités. Les encrassements au niveau de la chaudière et du condenseur augmentent les gradients de température nécessaires aux transferts et augmentent donc les irréversibilités. Toutefois, on peut considérer que ces irréversibilités sont des irréversibilités externes, liées aux sources et puits de chaleur, et ne considérer que les irréversibilités dites internes du cycle (pompe, turbine, frottements). Si ces derniers composants fonctionnent de manière réversible, le cycle serait dit alors 'intérieurement réversible'.
- *Perte thermique* : les pertes thermiques causées par le transfert de chaleur entre le fluide de travail circulant dans l'installation avec l'environnement influencent directement le bilan au sens du premier principe. Elles peuvent être aussi vues comme des irréversibilités internes du système car le transfert de chaleur vers l'extérieur est opéré sous un gradient non nul. Cette perte de chaleur se situe dans les tubes de liaisons entre les composants du cycle. Les éventuelles pertes thermiques qui se situent dans les composants du cycle se traitent au niveau de chacun de ceux-ci qui fonctionnerait alors de manière adiabatique ou non. Pour compenser toutes ces pertes thermiques indésirables, plus de chaleur doit être transférée au fluide de travail dans la chaudière.

4.3. Différents types de chaudières

1- Chaudières à tubes d'eau

a. Présentation

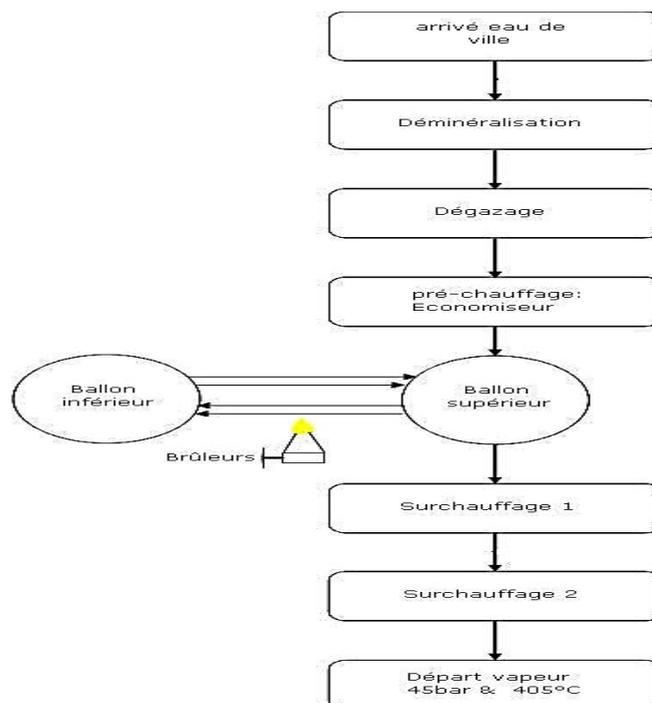
Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée supérieur à 20 t/h, en moyenne et haut pression. Le combustible utilisé est soit du gaz, du fioul, du charbon ou déchets.



Figure 7 Une chaudière à tube d'eau.

b. Fonctionnement

Le fonctionnement d'une chaudière fait intervenir deux principaux circuits : un circuit Eau/vapeur dont le but est la transformation de l'eau en vapeur afin d'obtenir une vapeur à 400°C et 45bar ; et un circuit air/gaz qui sert à produire de la chaleur par la combustion. Ces deux circuits seront détaillés dans la figure suivante :



b.1. Circuit Eau/Vapeur

- **L'arrivée de l'eau d'alimentation :**

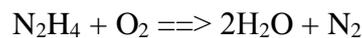
L'eau d'alimentation est stockée dans une bache, provient en partie des condensats de vapeur en retour après utilisation, et l'eau déminéralisée. Cette eau est aspirée par une pompe et refouler dans le dégazeur pour éliminer l'oxygène O₂ qui existe dans l'eau. Ce dégazage se fait par deux méthodes en même temps :

- **La première méthode**

Consiste à faire un dégazage par la vapeur très basse pression (VBB = 0.8), on injecte la vapeur dans le dégazage, et grâce à un barbotage l'O₂ dégage vers l'atmosphère.

- **La deuxième méthode**

On utilise dans cette méthode un produit chimique, le plus utilisable est l'hydrate d'hydrazine (N₂H₄), dont la réaction chimique, s'écrit comme suit :



Après ce phénomène de dégazage, les pompes aspirent l'eau du dégazeur et la refoule dans le ballon supérieur par le passage par l'économiseur.

- **Passage par l'économiseur**

L'économiseur reçoit l'eau d'alimentation refoulée par la ou les pompes alimentaires. Il est généralement situé sur le parcours des fumées, ce sont les fumées produites lors de la combustion qui cèdent leur chaleur à l'eau d'alimentation avant de passer au ballon supérieur.

- **Stockage dans le ballon supérieur**

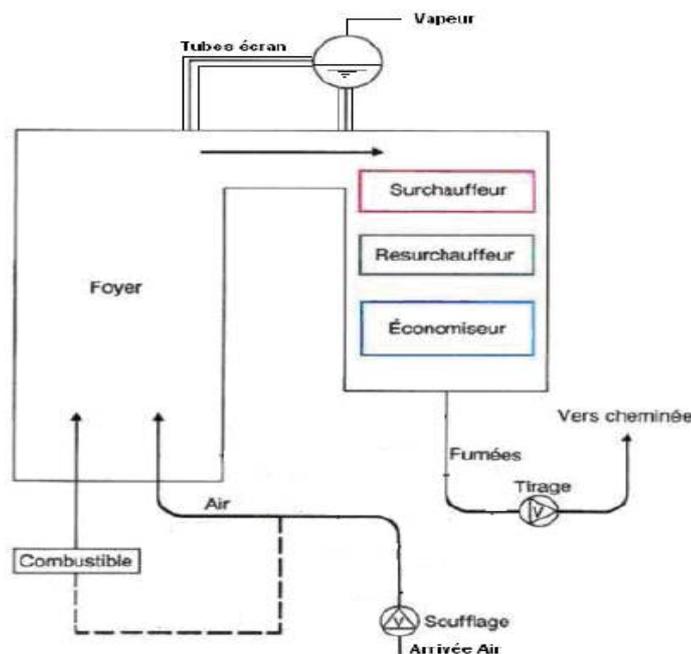
L'eau venant de l'économiseur est stockée au niveau du ballon supérieur. Après, l'eau passe à travers des tubes appelés tubes écrans qui sont exposés directement aux flammes.

- **Passage par les surchauffeurs 1 et 2**

Si la température désirée de la vapeur n'est pas encore atteinte une valeur de 400°C à 405 °C ou si la vapeur contient encore des gouttes d'eau, on a recouru au surchauffeur. Il consiste à faire passer la vapeur par des serpentins dans la chambre de combustion, ces derniers seront exposés à la chaleur fournit par la fumée. Ainsi on aura de la vapeur.

b.2. Circuit Air/Gaz

Dans le circuit air/gaz, comburant (air) aspiré par le ventilateur de soufflage à l'atmosphère est envoyé dans les brûleurs. Il est ensuite envoyé dans la chambre de combustion. L'oxygène de l'air se combine alors avec le combustible Fioul Oïl (FO) en introduisant de la chaleur et les fumées. Ces fumées passent ensuite par les tubes de l'économiseur pour l'échauffement de l'eau d'alimentation avant d'être évacuées vers l'atmosphère. La figure suivante schématise ce circuit :



c. Précautions

La formation de tartre dans les tubes serait préjudiciable au fonctionnement de la chaudière à tubes d'eau pour les mêmes raisons que celles évoquées à propos des chaudières à tubes de fumée. En outre, l'obturation des tubes pourrait se révéler dangereuse, ce qui ajoute à la nécessité de traiter l'eau de chaudière. La paroi extérieure des tubes est exposée aux dépôts

des suies et nécessite une action de ramonage pendant le fonctionnement de la chaudière. Cette action est obtenue par injection de vapeur ou d'air comprimé via un tube perforé.

d. Production de vapeur surchauffée

Dans une chaudière à tubes d'eau, la tuyauterie qui prend en charge la vapeur saturée retourne dans le foyer, les gaz chauds apportent à cette vapeur saturée une énergie supplémentaire qui en élève la température sans en modifier la pression. On obtient ainsi de la vapeur surchauffée à la sortie.

2- Chaudières à tubes de fumés

a. Présentation

Ce sont les chaudières les plus courantes dans l'industrie. Leur conception ne permet pas d'atteindre de haute pression, mais elles ont une grande réserve de vapeur et permettent d'absorber les demandes du réseau sans observer une trop grande baisse de pression. L'appellation « tube de fumée » provient de la conception. En effet, le parcours des fumées Ce tube de chaudières fournit un débit de vapeur de 1 à 25 t/h, en basse et moyenne pression. Le combustible utilisé est soit du gaz soit du fuel .



Figure 8. Une chaudière à tube de fumée

b. Fonctionnement

Le tube foyer, qui se trouve dans le ballon même de la chaudière, sous le plan d'eau, collecte les gaz chauds en sortie de brûleur. Les gaz chauds, accumulés dans un premier caisson à l'arrière de la chaudière, sont véhiculés par un groupe de tubes immergés dans l'eau du ballon

vers un second caisson à l'avant de la chaudière. Il y a donc circulation des gaz de combustion dans des tubes assurant, par conduction vers l'eau de la cuve, la vaporisation par apport de calories. La figure suivante montre le parcours des fumées dans les tubes et on peut observer que la combustion prend place au centre du générateur de vapeur.

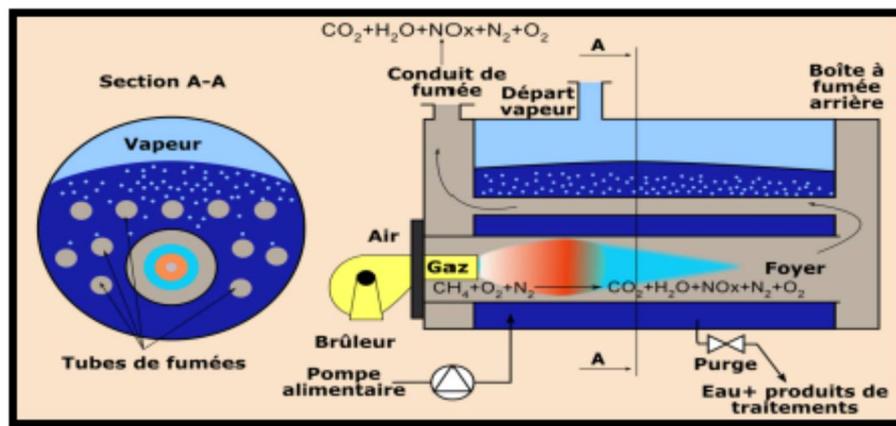


Figure 9. Principe de fonctionnement d'une chaudière à tube de fumée

c. Précautions

Il est impératif de traiter l'eau de chaudière afin d'éviter le dépôt de tartre à l'extérieur du tube foyer et des tubes de fumée. En effet, le tartre provoquerait un mauvais échange thermique, un temps de mise en pression-température plus long, un risque surchauffe au niveau de tube foyer, une surconsommation de combustible, une augmentation de température des fumées au niveau de la cheminée.

V.1.d. Production de vapeur surchauffe

Il est nécessaire de recourir à une surchauffeur (source de chaleur indépendante), en aval de la chaudière à tube de fumée.

3- Chaudières de récupération

a- Définition :

Une chaudière de récupération est conçue pour répondre à plusieurs critères de choix dont l'importance varie d'un cas à l'autre. Ces critères sont les suivants :

— **rendement** : comme pour une chaudière conventionnelle, on doit rechercher à produire la vapeur avec une perte thermique le plus faible possible ;

— **fiabilité** : si l'installation est incluse dans la chaîne de fabrication d'un produit, ce critère devient primordial ce qui est souvent le cas ;

— **simplicité de conduite** : très souvent la chaudière n'est pas conduite par un spécialiste mais par une équipe exploitant la chaîne de production ; il est donc nécessaire que les manœuvres soient, dans toute la mesure du possible, simples et peu nombreuses ;

— **bonne adaptation à l'ensemble industriel** : concevoir ce type de matériel nécessite de la part du technicien, en plus de ses qualités de thermicien, une bonne connaissance de l'ensemble dans lequel sera intégrée la chaudière ; il devra donc acquérir des notions en métallurgie, chimie, papeterie, etc., et dans bien d'autres secteurs industriels. Voyons, par ordre chronologique, les décisions que doit prendre le constructeur de chaudières pour résoudre un problème de récupération thermique.

b- Le domaine des chaudières de récupération

Le domaine des chaudières de récupération ne touche que deux secteurs de l'économie d'énergie :

— la **récupération thermique**, qui consiste à récupérer l'énergie sensible ou latente contenue dans un gaz, un liquide ou un solide dans un générateur de vapeur, d'eau ou de fluide thermique avec ou sans combustion ;

— la **régénération thermique**, qui consiste, par échange de chaleur, à régénérer un produit de manière qu'on puisse le réutiliser soit comme combustible, soit comme corps entrant dans une fabrication.

c- Types de chaudières de récupération

✓ *Chaudières à circulation naturelle*

✓ *Chaudières à circulation contrôlée*

✓

4. Circulation de l'eau dans les chaudières.

La circulation a deux objectifs principaux :

— assurer le **refroidissement correct des tubes** situés dans les zones les plus chaudes ou exposés au rayonnement direct du feu, et qui reçoivent en cet endroit le flux maximal de chaleur ;

— assurer la génération de la vapeur saturée, c'est-à-dire le **passage du fluide chauffé de l'état eau à l'état émulsion et vapeur** (à l'exclusion des chaudières à pression supercritique pour lesquelles le fluide véhiculé est simplement chauffé). Les trois types de circulation : circulation naturelle, assistée par pompe et forcée font appel aux mêmes phénomènes physiques étudiés ci-après mais se différencient en raison des domaines d'application.

1. Modes de circulation

a. Circulation naturelle

La circulation de l'émulsion est dite naturelle, en ce qu'elle s'établit d'elle-même dans les circuits de la chaudière, par le jeu des différences de masse volumique des colonnes de fluide en présence ; le débit en circulation est de quarante à dix fois plus important que le débit de vapeur nominal de la chaudière, pour des pressions de fonctionnement allant par exemple de 20 à 120 bar.

b. Circulation assistée par pompe

Pour surmonter les difficultés que l'on trouve en circulation naturelle lorsque la pression d'utilisation devient plus importante, ou lorsque le choix d'un modèle de construction d'échangeur impose des parcours horizontaux ou même descendants, il est apparu rationnel d'assurer la circulation grâce à une pompe (centrifuge, en général). Ce mode de fonctionnement a été utilisé et vulgarisé sous la désignation de système LA MONT, dont les brevets sont depuis longtemps dans le domaine public.

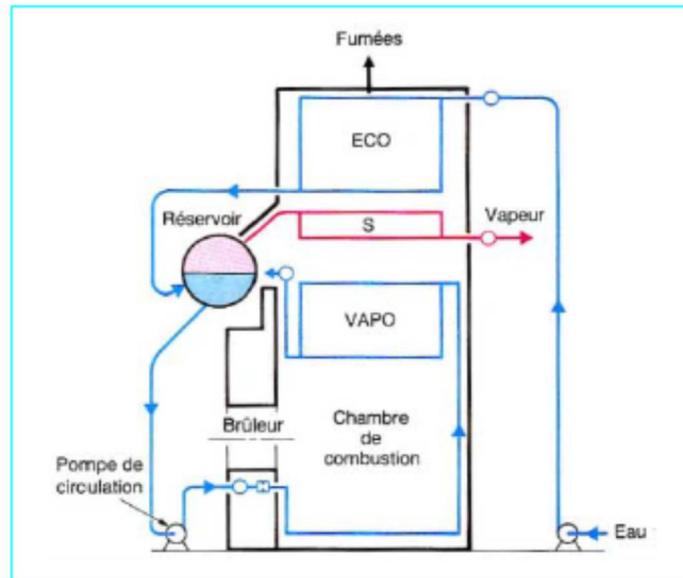


Figure 10. Schéma de principe d'une chaudière à circulation assistée LA MONT (circuit fermé) : exemple de disposition des surfaces d'échange

c. Circulation forcée

Sous sa forme la plus simple, une chaudière à circulation forcée est constituée par un ensemble de tubes alimentés en parallèle, dans lesquels l'eau est successivement réchauffée et vaporisée, puis la vapeur surchauffée (voir figure). La circulation de l'eau est assurée par les pompes alimentaires dont la hauteur de refoulement est déterminée en tenant compte de la perte de charge totale des circuits évaporateurs et surchauffeurs.

Ce principe permet une grande liberté dans la conception des circuits, puisque la circulation est toujours assurée quel que soit le tracé des tubes évaporateurs, qui peuvent comporter des parties horizontales ou même descendantes.

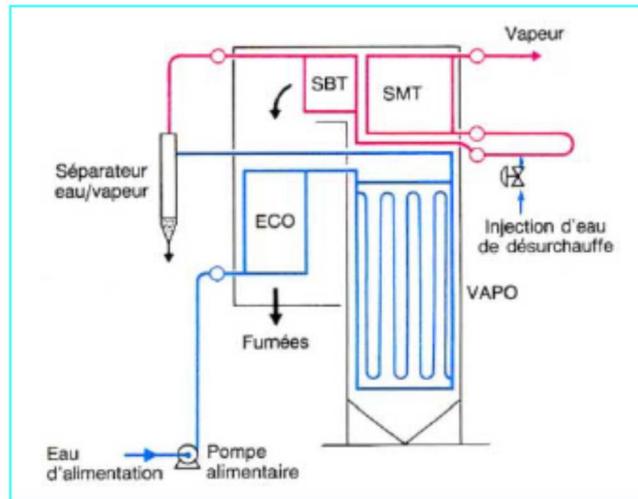


Figure 11. Schéma de principe d'une chaudière à circulation forcée pure : exemple de disposition des surfaces d'échange

5. Calcul thermique d'une chaudière

a. Les méthodes de calcul du rendement

Le rendement d'une chaudière est le rapport entre l'énergie produite et l'énergie introduite, il est calculé par deux méthodes différentes :

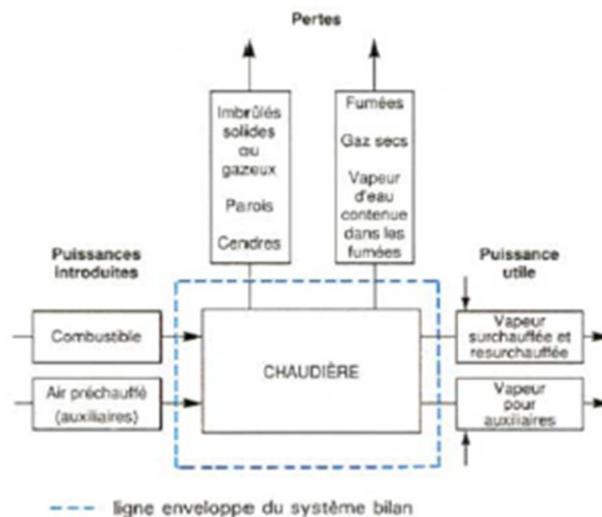


Figure 12. Bilan d'énergie du système chaudière

1. Première méthode

Le rendement est défini comme étant le rapport entre l'énergie produite utile et l'énergie totale introduite. Il est exprimé par la relation suivante :

$$\eta = \text{Energie utile} / \text{Energie introduite}$$

La puissance utile est calculée par la formule :

$$Q_U = \sum D_s h_s - \sum D_i h_i$$

Avec : h_i (kJ/kg) : enthalpie de l'eau entrante.

h_s (kJ/kg) : enthalpie de la vapeur sortante.

D_i (kg/s) : débit de l'eau entrante.

D_s (kg/s) : débit de la vapeur sortante.

1.1. Les puissances introduites dans la chaudière

Les puissances introduites sont de différentes natures, la principale provenant du combustible.

1.1.a. Puissance introduite sous forme d'Enthalpie de formation du combustible :

Il s'agit du Pouvoir Calorifique Inférieur du fioul lourd PCI, pour obtenir la puissance, il suffit de multiplier par le débit de combustible.

Cette puissance est exprimée par : $Q_1 = \text{PCI} \times D_{\text{fuel}}$; Avec : D_{fuel} : le débit de combustible

1.1.b. Puissance introduite sous forme d'enthalpie sensible du fioul

Etant donné que le fioul est préchauffé avant son admission dans la chambre de combustion, il possède donc une chaleur sensible. Effectivement ce préchauffage est assuré à l'aide de serpentins alimentés en vapeur comme on l'a déjà signalé précédemment.

Le but de ce préchauffage est d'avoir une bonne combustion résultant d'une diminution de la viscosité du fioul. Cette puissance est exprimée par :

$$Q_{\text{fuel}} = Q_2 = D_{\text{fuel}} C_{\text{pm}} (T_{\text{af}} - T_r)$$

Avec : D_{fuel} : débit de fuel (kg/h)

C_{pm} : chaleur spécifique moyenne du fuel à pression constante en kcal/ kg. K

T_{af} : Température d'admission du fioul

T_r : Température de référence.

1.1.c. Puissance introduite sous forme de chaleur sensible de l'air comburant

Même dans le cas de l'absence d'un système de préchauffage, la température de l'air à l'entrée de la chaudière est supérieure à celle l'ambiante, ceci résulte du fait de la mise sous pression de l'air par les pompes d'aspiration. Cet air qui est aspiré du milieu ambiant est de l'air humide (mélange d'air sec et de vapeur d'eau). Cette puissance est exprimée par :

$$Q_a = Q_3 = D_a C_{\text{pa}} (T_{\text{aa}} - T_r)$$

Avec : D_a : débit d'air (Kg/h)

C_{pa} : chaleur spécifique moyenne de l'air à Pression constante et à une température moyenne en kcal/ kg°K

T_{aa} : température d'aspiration de l'air °C.

T_r : Température de référence

la puissance globale introduite dans les chaudières :

On a : $Q_{\text{in}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$; Tel que :

$Q_1 = D_{\text{fuel}} * PCI_{\text{fuel}}$ Puissance provenant de l'enthalpie de formation du combustible.

$Q_2 = Q_{\text{fuel}} = D_{\text{fuel}} * C_{\text{pfuel}} * (T_{\text{fuel}} - T_r)$ Puissance introduite sous forme d'enthalpie sensible du fuel.

$Q_3 = D_a C_p \text{ air} (T_{\text{aa}} - T_r)$ la puissance apportée par l'air.

2. Deuxième méthode

La quantité de chaleur perdue constitue l'écart entre l'énergie totale introduite et l'énergie utile reçue par l'eau de la chaudière. Elle regroupe principalement :

- Les pertes par fumées.
- Les pertes par parois.

2.1. Pertes par fumées

Les pertes par les fumées proviennent :

- ✓ De la chaleur sensible contenue dans les fumées qui sont nettement plus chaudes que l'air aspiré dans la chaufferie.
- ✓ Des imbrûlés issus d'un mauvais mélange entre l'air et le combustible, provoquant la production de CO au lieu de CO₂ (la chaleur dégagée est alors inférieure à celle fournie par une combustion complète). Une augmentation des pertes par les fumées peut provenir soit d'un mauvais excès d'air qui peut être dû à :

- Un mauvais réglage au niveau du brûleur.

- Des problèmes d'entretien tels qu'une mauvaise distribution de l'air ou une mauvaise pulvérisation du fuel. Les trois mesures T_f , T_a et %CO₂ étant faites, on évalue les pertes par chaleur sensible dans les fumées en pourcentage du PCI à l'aide de la formule de Siergert suivante :

$$Pertes = K \times (T_f - T_a) / (\%CO_2)$$

Avec :

T_f : température des fumées

T_a : température de l'air ambiant.

%CO₂ : teneur en CO₂ des fumées (en %).

K est le coefficient de Siergert varie avec le combustible. Il est déterminé par la formule :

$$K = 0,008 * \%CO_{2max} + 0,48$$

2.2. Pertes par parois

Elles sont dues aux échanges thermiques par rayonnement et par convection entre l'air ambiant et les parois de la chaudière. Ces pertes dépendent des dimensions des parois et de la nature de leurs matériaux de construction. Elles sont exprimées par la relation suivante :

$$Q_P = P' * C * P_M / P$$

C : Coefficient d'écran ($C = 0.75$)

P' : Valeur de la perte par parois à la M, exprimée en pourcentage du PCI du fioul consommé.

($0.59 < p' < 0.6$) avec : P_M : Puissance maximale de la chaudière ; P : Puissance de la chaudière lors de l'essai.

➤ Rendement de la combustion

Lorsqu'on ne tient compte que des pertes par fumées, le rendement obtenu est appelé « rendement de la combustion » calculé par la relation suivante :

$$\eta_c = 100 - \text{Pertes fumées (en \% PCI)}$$

2.3. Rendement global

Le rendement global est exprimé comme suit :

$$R = 100 - \text{pertes/Energie introduite} = 100 - (\pi/Q_{in})$$

$$\text{Pertes globales : } \pi = Q_f + Q_p$$

$$\text{Puissance introduite : } Q_{in} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

6. Principaux paramètres à surveiller lors d'exploitation d'une chaudière (Facteurs affectant le rendement) :

1. La température des gaz de combustion

2. Excès d'air

3. Surfaces d'échange encrassés (50% pertes par gaz combustion et 2% en perte combustible)
4. Traitement inapproprié de l'eau
5. Température de l'eau d'alimentation
6. Pertes par rayonnement
7. Température de l'air de combustion
8. Nature du combustible

Bibliographie:

1. *Georges Monnot ; "La Combustion dans les fours et les chaudières", , Editions TECHNIP, 1978*
2. *Markus Haider, Philippe Seguin, "Chaudières. Systèmes de combustion, circuits eau/vapeur et air/fumées", Techniques de l'ingénieur, BE 8 731, octobre 2012*
3. *Analyse de combustion industrielle, Directive pour les mesures d'émissions et de processus, 3e édition révisée, Testo SE & Co. KGaA, en janvier 2018*
4. *les produits de combustion, disponible sur e site web,' <https://www.maxicours.com/se/cours/les-produits-de-combustion/>, le 25/02/2020*
5. *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*
6. *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*
7. *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*

8. *Jacobowicz, Isidore. Fours industriels. Ed. Techniques Ingénieur, 2009.*
9. *Mahrez Mohamed, Abbas Oussama, « Performance du cycle eau-vapeur des chaudières industrielles », mémoire master en génie mécanique, énergétique, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, Algérie 2018*
10. *Boumertit Sofiane, « Commande par logique floue d'un circuit de combustion d'une chaudière de type compact (Réalisé à CEVITAL-Bejaia) », mémoire Master Académique en Electronique, Université Abderrahmane MIRA-Bejaia, Algérie 2012*
11. *Jean Parisot, « Conception et calcul des chaudières : généralités et bilans », Techniques de l'ingénieur B 1 460, 1993*
12. *Aliouane Abdelkader, « conception et réalisation d'une chaudière à biomasse », mémoire master en génie mécanique, université de Mohamed Bougara, Boumerdes, Algérie, 2017*
13. *Disponible sur le site web :<http://boowiki.info/art/diagrammes-thermodynamiques/diagramme-thermodynamique.html> , date 14/05/2020*
14. *Disponible sur le site web : http://enim-s-web.enim.site.univ-lorraine.fr/~huynen1/3A_Thermo_C1_Corps_purs/C1_Corps_purs_web.publi/auroraW/co/C1_Corps_purs_26.html , date 14/05/2020*
15. *Michel Philippe, « Chaudières de récupération », Techniques de l'ingénieur, B 126, 1980*
16. *Jean Parisot, « Conception et calcul des chaudières : foyer et circulation», Techniques de l'ingénieur B 1 461, 1993*
17. *EMC & GIZ/Reactivate, Formation Efficacité énergétique dans l'industrie, Casablanca, Maroc, 21 - 25 Février 2017*
18. *Isidore JACUBOWIEZ, « Fours industriels », Techniques de l'ingénieur, BE 8 842, 1998*