



**La République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de Génie des Procédés**



**Polycopié de Cours et TD**

# **Fours et Chaudières**

**Niveau 1<sup>ère</sup> Année Master en**  
**Génie Chimique**



**Conçu et réalisé par :**

**Dr MEZOUAGH Amina**

**Année Universitaire : 2021 – 2022**



# Sommaire

<b>Chapitre I : INTRODUCTION</b> .....	1
I.1 Introduction.....	1
I.2 Révision des concepts de base .....	1
I.2.1 Rappel de Transfert de Chaleur .....	1
I.2.1.1 Définition.....	1
I.2.1.2 La conduction.....	2
I.2.1.3 La convection.....	3
I.2.1.4 Le rayonnement.....	4
I.2.2 La Température.....	5
I.2.3 La Chaleur .....	5
I.2.4 Différence entre la température et la chaleur .....	6
I.2.5 Quelques définitions thermodynamique .....	6
I.2.5.1 Capacité Calorifique et Chaleur Latente .....	6
I.2.5.1.1 Capacités calorifiques.....	7
I.2.5.1.1.a Capacité calorifique massique ou Chaleur Massique (c) .....	7
I.2.5.1.1.b Capacité calorifique molaire (c') .....	7
I.2.5.1.1.b.1 Capacités calorifiques des gaz.....	8
I.2.5.1.1.b.2 Capacités calorifiques des solides et des liquides .....	8
I.2.5.1.2 Chaleur latente : quantité de chaleur liée à un changement d'état.....	9
I.2.5.2 Mesure de l'énergie thermique .....	9
I.2.5.3 Enthalpie .....	10
<b>Chapitre II : COMBUSTIBLES ET ENERGIE DE COMBUSTION</b> .....	11
II.1 Introduction.....	11
II.2 Définitions .....	11
II.2.1 Combustion.....	11
II.2.2 Réaction de combustion.....	12
II.2.3 Combustible .....	13
Composition et exemples de combustibles .....	14
┌ Combustibles Solides .....	14
┌ Combustibles Liquides .....	14
┌ Combustibles Gazeux.....	14

II.2.4	Comburant .....	15
II.3	Produits de combustion (fumées).....	15
II.4	Les différents types de combustion.....	16
II.4.1	La combustion incomplète.....	16
II.4.2	Combustion complète.....	17
II.4.3	La combustion stœchiométrique .....	17
II.4.4	La combustion réelle .....	18
II.4.4.1	La combustion complète oxydante ou en excès d'air .....	18
II.4.4.2	La combustion réductrice .....	19
II.5	Equations chimiques de base .....	19
II.6	Caractéristiques de la combustion.....	20
II.6.1	Seuils de démarrage.....	20
II.6.2	Propagation .....	20
II.7	Thermodynamique de la combustion .....	21
II.7.1	Combustion à volume constant (isochore) .....	21
II.7.2	Combustion à pression constante (isobare) .....	21
II.7.3	Enthalpie standard de formation .....	21
II.7.4	Chaleur de la réaction dans les conditions standards .....	22
II.7.5	Chaleur de la réaction à une température quelconque.....	22
II.7.6	La chaleur de combustion.....	22
II.8	Calcul et grandeurs de combustion .....	23
II.8.1	Pouvoirs calorifiques d'un combustible .....	23
II.8.1.1	Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) .....	23
II.8.1.2	Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) .....	23
II.8.1.3	Relation entre les pouvoirs calorifiques PCI et PCS.....	24
II.8.2	Etude des paramètres caractéristiques de la combustion théorique .....	25
II.8.2.1	Le pouvoir comburivore .....	26
II.8.2.2	Pouvoir fumigène .....	26
II.8.2.3	Autres expressions des pouvoirs comburivore et fumigène .....	27
II.8.2.3.1	Cas des combustibles solides et liquides .....	27
II.8.2.3.2	Cas des combustibles gazeux.....	28
II.8.2.3.3	Exemples de calcul .....	29
II.8.3	Paramètres caractéristiques de la combustion réelle .....	30

II.8.3.1	Facteur d'air .....	31
II.8.3.2	Excès d'air .....	31
II.8.3.3	Défaut d'air .....	32
II.8.4	Combustion oxydante .....	32
II.9	Qualité de la combustion .....	34
II.10	Les équipements de combustion .....	35
II.11	Aspects environnementaux liés à la combustion .....	37
<b>Chapitre III : LES FOURS INDUSTRIELS</b>	.....	<b>41</b>
III.1	Introduction.....	41
III.2	Classification des fours industriels.....	42
III.2.1	Classification selon la manutention du produit.....	42
III.2.1.1	Fours continus .....	42
III.2.1.2	Four discontinu .....	42
III.2.2	Classification selon le procédé de chauffage .....	44
III.2.2.1	Fours à chauffage direct .....	44
III.2.2.2	Fours à chauffage indirect .....	45
III.2.3	Classification selon le niveau de température.....	45
III.2.4	Classification selon le combustible .....	46
III.3	Description et composants des fours industriels .....	46
III.3.1	La zone de radiation ou zone de rayonnement.....	47
III.3.2	La zone de convection ou carneau .....	47
III.3.3	La cheminée .....	47
III.4	Principaux types des fours .....	49
III.4.1	Selon la géométrie .....	49
III.4.1.1	Les fours cylindriques verticaux .....	49
III.4.1.2	Les fours cabines.....	51
III.4.1.2.a	Fours cabines à brûleurs sur la sole .....	52
III.4.1.2.b	Fours cabines à brûleurs sur les parois .....	53
III.4.2	Selon la fonction .....	54
III.4.2.1	Les fours de réchauffage de fluide sans changement de phase.....	54
III.4.2.2	Les fours de réchauffage de liquide avec vaporisation partielle .....	54
III.4.2.3	Les fours de réchauffage de fluide avec une réaction chimique dans les tubes.....	55

III.5	Principaux critères de choix d'un four .....	55
III.6	Calcul thermique des fours .....	55
III.6.1	Bilans énergétiques .....	55
III.6.1.1	Rendement énergétique des fours .....	56
III.6.1.2	Paramètres dont dépend le rendement d'un four .....	57
III.6.2	Rendement de combustion.....	58
III.6.3	Relation entre le rendement énergétique et le rendement de combustion .....	59
III.6.4	Problème de dimensionnement des fours .....	59
III.6.5	Possibilités et limites à l'amélioration du rendement d'un four .....	60
III.6.5.1	Réduction des pertes aux parois.....	60
III.6.5.2	Réduction des pertes aux fumées .....	60
III.7	Construction des fours .....	61
III.7.1	Garnissage des parois du four (Enveloppe) .....	61
III.7.1.a	Charpente et Casing .....	61
III.7.1.b	Isolation thermique.....	62
III.7.1.b.1	Briques réfractaires.....	63
III.7.1.b.2	Bétons réfractaires .....	64
III.7.1.b.3	Fibres céramiques.....	64
III.7.2	Zones d'échange.....	65
III.7.2.1	Faisceau tubulaire.....	65
III.7.2.2	Supportage des tubes .....	68
III.7.2.3	Disposition des tubes à l'intérieur du four.....	69
III.7.2.4	Circulation du fluide process .....	71
III.7.3	Bruleurs .....	73
III.7.3.1	Définition.....	73
III.7.3.2	Rôle d'un bruleur .....	73
III.8	Applications des fours .....	74
III.8.1	Applications des fours directs.....	74
III.8.2	Applications des fours indirects.....	74
III.9	Exploitation des fours industriels.....	74
III.9.1	Démarrage initial d'un four et opération de Séchage.....	74
III.9.2	Mise en service et contrôle de fonctionnement d'un four .....	76
III.9.3	Arrêt d'un four .....	81

III.9.3.1	Etapas de l'arrêt d'un four .....	81
III.9.3.2	Arrêt normal.....	82
III.9.3.3	Arrêt d'urgence .....	83
III.9.4	Décokage des tubes de four .....	84
<b>Chapitre IV</b>	<b>: LES CHAUDIERES INDUSTRIELLES .....</b>	<b>86</b>
IV.1	Introduction.....	86
IV.2	Définition de la chaudière .....	86
IV.3	Rôle des chaudières industrielles .....	86
IV.4	Pressions spécifiques à une chaudière .....	87
IV.5	Aspect thermodynamique des chaudières.....	87
IV.5.1	Diagramme thermodynamique.....	87
IV.5.2	Diagramme entropique .....	88
IV.5.3	Les propriétés de la vapeur .....	89
IV.5.3.1	Formation de la vapeur.....	90
IV.5.3.2	Effet de l'augmentation de la pression.....	92
IV.5.4	Utilisation de la vapeur.....	92
IV.6	Différents types de chaudières .....	92
IV.6.1	Chaudière à tubes d'eau.....	93
IV.6.1.1	Éléments constitutifs d'une chaudière tubes à eau.....	94
IV.6.1.1.1	L'écran de tubes .....	94
IV.6.1.1.2	Les bruleurs.....	96
IV.6.1.1.3	La chambre de combustion (le foyer) .....	97
IV.6.1.1.4	Le faisceau vaporiseur ou Faisceau de convection .....	97
IV.6.1.1.5	Le ballon supérieur ou ballon vapeur .....	97
IV.6.1.1.6	Le ballon inférieur .....	98
IV.6.1.1.7	Le surchauffeur .....	98
IV.6.1.1.8	Désurchauffeur.....	99
IV.6.1.1.9	L'économiseur .....	99
IV.6.1.1.10	Réchauffeur d'air.....	100
IV.6.1.1.11	Le ventilateur de soufflage.....	100
IV.6.2	Chaudières à tubes de fumées .....	101
IV.6.2.1	Définition.....	101
IV.6.2.2	Elément d'une chaudière à tube de fumées .....	102

IV.6.2.3	Fonctionnement.....	103
IV.6.3	Chaudières de récupération.....	104
IV.7	Description de fonctionnement de la chaudière process .....	105
IV.8	Circulation de l'eau dans les chaudières.....	107
IV.9	Circuit Air/Gaz.....	110
IV.10	Les modes de transfert de chaleur dans une chaudière.....	110
IV.11	Calcul thermique d'une chaudière .....	111
IV.11.2	Calcul du rendement d'une chaudière .....	112
IV.11.2.1	Première méthode (méthode directe) .....	112
IV.11.2.1.1	Les puissances introduites dans la chaudière.....	112
IV.11.2.1.1.a	Puissance introduite sous forme d'Enthalpie de formation du combustible.....	112
IV.11.2.1.1.b	Puissance introduite sous forme d'enthalpie sensible du fioul.....	113
IV.11.2.1.1.c	Puissance introduite sous forme de chaleur sensible de l'air comburant .....	113
IV.11.2.1.2	La puissance globale introduite dans les chaudières .....	114
IV.11.2.2	Deuxième méthode.....	114
IV.11.2.2.1	Pertes par fumées.....	114
IV.11.2.2.2	Pertes par parois .....	115
IV.11.2.2.3	Rendement de la combustion .....	115
IV.11.2.2.4	Rendement global.....	115
IV.12	Principaux paramètres à surveiller lors de l'exploitation d'une chaudière .....	116
	Références Bibliographie.....	117

## *Liste des Tableaux*

Tableau II.1 : Enthalpie standard de quelques espèces chimiques.....	22
Tableau II.2 : Emissions engendrées par les systèmes de combustion et leurs effets .....	37
Tableau II.3 : Directives du ccme sur les émissions de NO <sub>x</sub> pour les systèmes de chauffage neufs.....	39
Tableau II.4 : Émissions courantes de NO <sub>x</sub> sans équipement de contrôle de NO <sub>x</sub> .....	40
Tableau IV.1 : Propriétés de la vapeur .....	89
Tableau IV.2 : Propriétés des chaudières à tubes de fumée et à tubes d'eau.....	103

# *Liste des Figures*

Figure I.1: Exemple de transfert de chaleur par conduction .....	2
Figure I.2 : Exemple de transfert de chaleur par convection .....	3
Figure I.3 : Exemple de transfert de chaleur par rayonnement .....	5
Figure II.1 : Triangle de feu .....	12
Figure II.2 : Schéma de la réaction de combustion .....	13
Figure II.3 : Exemples d'une combustion incomplète des combustibles fossiles .....	16
Figure II.4 : Exemples d'une combustion stœchiométrique .....	18
Figure II.5 : Exemples d'une combustion en excès d'air .....	19
Figure II.6 : Diagramme d'Oswald .....	35
Figure III.1 : Réchauffeur direct (four) .....	44
Figure III.2 : Réchauffeurs indirects (récupération d'énergie à droite).....	45
Figure III.3 : Four à combustible .....	48
Figure III.4 : Composants des fours .....	49
Figure III.5 : Four cylindrique vertical .....	51
Figure III.6: Four industriel Cabine .....	52
Figure III.7 : Four cabine à tubes horizontaux.....	52
Figure III.8 : Fours cabines à brûleurs sur les parois .....	54
Figure III.9 : Schéma du bilan thermique d'un four.....	56
Figure III.10 : Charpente et casing .....	62
Figure III.11 : Isolation thermique d'un four (Casing de béton et briques réfractaires) .....	63
Figure III.12 : Les briques réfractaires .....	63
Figure III.13 : Bétons réfractaires .....	64
Figure III.14 : Fibres céramiques .....	65
Figure III.15 : Isolants utilisés en deuxième couche .....	65
Figure III.16 : Faisceau tubulaire .....	66
Figure III.17 : Tubes avec des ailettes.....	67
Figure III.18 : Coudes à 180°.....	67
Figure III.19 : Boite de retour .....	68
Figure III.20 : Supportage des tubes.....	69
Figure III.21 : Four vertical à serpentín hélicoïdal.....	70

Figure III.22 : Four de type cabine à tubes verticaux disposés en nappe .....	70
Figure III.23 : Dispositions typiques des tubes dans un four cylindrique .....	71
Figure III.24 : Circulation mono-passe en zone de convection et multi-passe en zone de rayonnement.....	72
Figure III.25 : Circulation mono-passe en zones de convection et de rayonnement .....	72
Figure III.26 : Bruleurs .....	73
Figure III.27 : Profil de température de séchage d'un four sans circulation de fluide .....	75
Figure III.28 : Profil de température de séchage d'un four avec circulation de fluide .....	75
Figure III.29 : Décokage mécanique par pigging.....	85
Figure IV.1 : Diagramme des phases .....	88
Figure IV.2 : Diagramme entropique .....	89
Figure IV.3 : Différents types de chaudières .....	93
Figure IV.4 : Chaudière à tubes d'eau.....	94
Figure IV.5 : L'écran de tubes .....	94
Figure IV.6 : Vue de face d'une chaudière .....	95
Figure IV.7 : Schéma d'une chaudière vue de haut .....	95
Figure IV.8 : Les bruleurs.....	96
Figure IV.9 : Les ballons de chaudière .....	98
Figure IV.10 : Surchauffeur .....	99
Figure IV.11 : Economiseur.....	99
Figure IV.12 : Réchauffeur d'air.....	100
Figure IV.13 : Le ventilateur de soufflage.....	101
Figure IV.14 : Chaudières à tubes de fumées .....	101
Figure IV.15 : Composants d'une chaudière .....	102
Figure IV.16 : Chaudières de récupération de procédés reformage primaire .....	104
Figure IV.17 : Chaudières de récupération d'un atelier d'acide nitrique .....	105
Figure IV.18 : Description d'une chaudière process vapeur à haute pression.....	107
Figure IV.19 : Circuit Eau/Vapeur .....	109
Figure IV.20 : Circuit Air/Fumée.....	110
Figure IV.21 : Bilan d'énergie d'une chaudière.....	111

# CHAPITRE I

# INTRODUCTION

## **Chapitre I : INTRODUCTION**

### **I.1 Introduction**

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.

Le transfert thermique se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

Le transfert de chaleur représente l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. C'est un phénomène que l'on trouve dans de nombreux secteurs de l'industrie et dans notre vie quotidienne.

Les ingénieurs et les techniciens se trouvent confrontés à ce genre de problème ; et essayent de maximiser ou de minimiser ce phénomène selon les besoins de l'industrie et dans le souci d'économiser cette énergie qui revient chère.

### **I.2 Révision des concepts de base**

#### **I.2.1 Rappel de Transfert de Chaleur**

##### **I.2.1.1 Définition**

Un transfert de chaleur ou transfert thermique entre deux corps est une interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre les 2 corps.

On distingue habituellement 3 modes de transfert de chaleur :

1. La conduction thermique
2. La convection
3. Le rayonnement thermique

Ces trois modes sont régis par des lois spécifiques et feront ainsi l'objet de chapitres différents, cependant strictement parlant, seuls la conduction et le rayonnement sont des modes fondamentaux de transmission de la chaleur ; la convection, tout en étant très importante, ne fait que combiner la conduction avec un déplacement de fluide.

### I.2.1.2 La conduction

L'agitation moléculaire élevée de la zone chaude communiquera de l'énergie cinétique aux zones plus froides par un phénomène appelé conduction de la chaleur. La conduction est un phénomène de diffusion qui permet donc à la chaleur de se propager à l'intérieur d'un corps solide sans déplacement appréciable de matière.

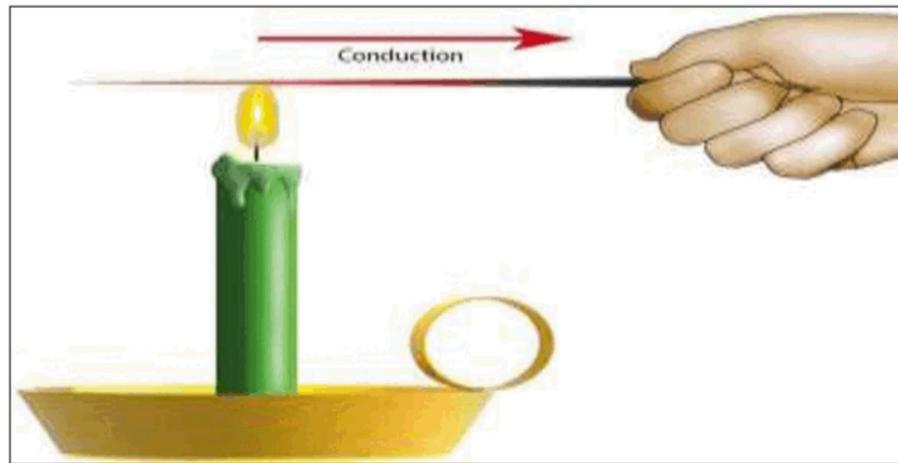
Dans la plupart des cas on étudie la conduction dans les milieux solides, puisque dans les milieux fluides, il y a souvent couplage avec un déplacement de matière et donc mécanisme de convection.

La conduction s'effectue de proche en proche :

Si on chauffe l'extrémité d'un solide il y a transfert progressif.

Si on coupe le solide, on stoppe le transfert.

**Exemple** : Barre de métal chauffée à l'une de ces extrémités (Figure I.1).



**Figure I.1:** Exemple de transfert de chaleur par conduction

L'échange de chaleur par conduction est défini par la relation de FOURIER (1822) ; la valeur instantanée de la quantité de chaleur transmise dans l'unité de temps est proportionnelle :

- A la section plane perpendiculairement traversée par le flux calorifique.
- A la conductivité thermique du matériau traversée qui dépend des propriétés physiques de la matière.
- Au gradient de température qui est le rapport de la variation de la température à la distance parcourue par le flux calorifique.

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot S \frac{dT}{dL} \quad (I. 1)$$

Avec

$dQ$  : quantité de chaleur

$dt$  : temps

$dT$  : température

$dL$  : épaisseur du matériau traversé par le flux de chaleur

$S$  : section traversée par le flux de chaleur

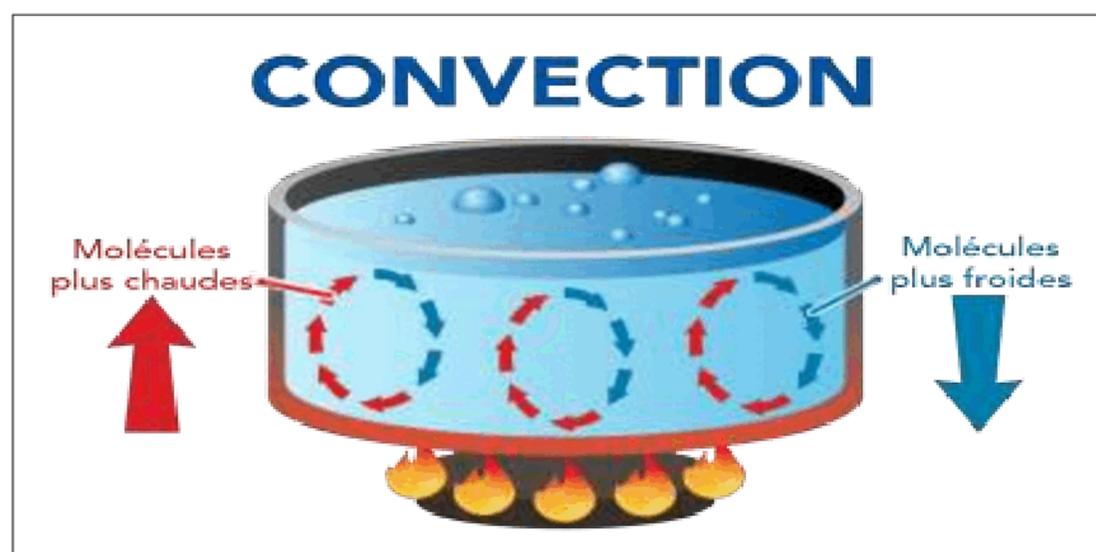
$\lambda$  : coefficient de conductivité thermique du matériau.

On voit que le gradient de température ( $dT/dL$ ) est négatif dans l'équation ci-dessus : cela signifie que le flux calorifique va du chaud au froid, le signe du gradient est opposé à celui du flux.

### I.2.1.3 La convection

C'est le transfert thermique entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

La cause profonde est encore une agitation des particules fluides, mais à une échelle beaucoup moins microscopique. Les parcelles de matière au contact de la paroi chaude (exemple figure I.2) s'échauffent par conduction ; le mouvement du fluide reporte ces parcelles dans la masse où elles cèdent par mélange une partie de la chaleur reçue ; d'autres les remplacent à la paroi et ainsi de suite.



**Figure I.2** : Exemple de transfert de chaleur par convection

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

Le flux de chaleur transmis par convection entre une surface et un fluide est donné par la relation suivante :

$$Q_c = h \cdot S(T_s - T_f) \quad \text{NEWTON (I.2)}$$

Avec

$Q_c$  : le flux de chaleur par convection (Kcal/hr)

$h$  : coefficient d'échange de chaleur (Kcal/h.m<sup>2</sup>.°C)

$S$  : surface d'échange (m<sup>2</sup>) où surface de contact entre le fluide et le solide

$(T_s - T_f)$  : différence de température entre la surface du solide  $T_s$  et celle du fluide  $T_f$  loin de la surface (°C).

$h.S = k_c$  conductance thermique par convection

$1/h.S = R_C$  résistance thermique par convection

On distinguera deux types de transferts convectifs :

- La convection **forcée** dans laquelle l'écoulement du fluide est forcé de l'extérieur par une machine (pompe, compresseur, ventilateur ...).
- La convection **naturelle** dans laquelle le mouvement du fluide est créé par des différences de densité, elles-mêmes provoquées par des différences de températures dues au contact du fluide avec la paroi plus chaude ou plus froide.

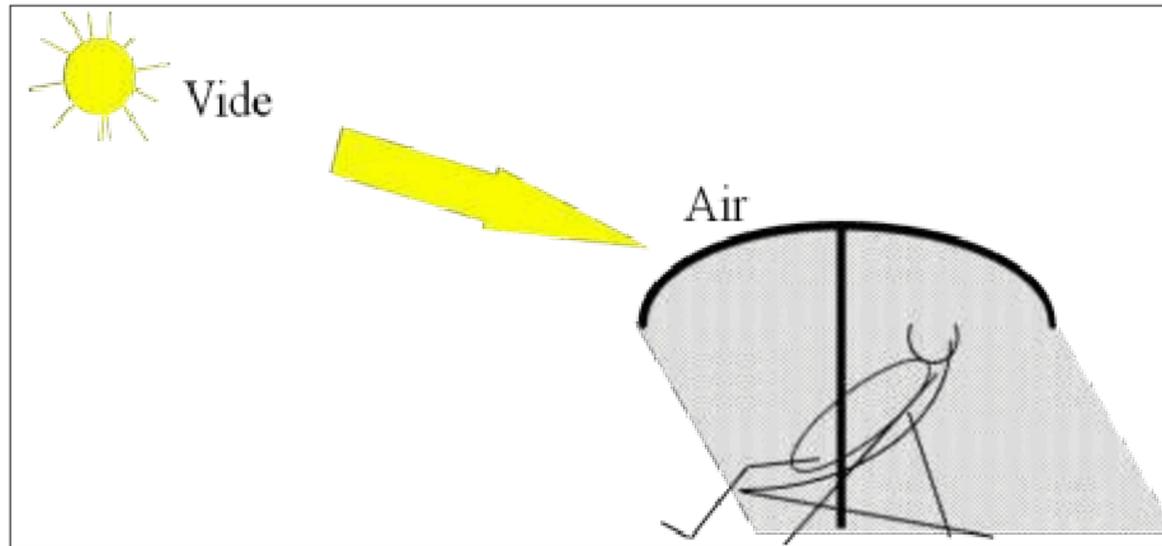
### I.2.1.4 Le rayonnement

Correspond à la propagation de photons. L'énergie électromagnétique reçue par le système est absorbée et convertie en énergie thermique (chaleur).

Le rayonnement thermique peut être considéré comme un cas particulier du rayonnement électromagnétique. L'exemple le plus simple est celui du rayonnement solaire (Figure I.3).

Le rayonnement thermique est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre plus froid sans nécessité de support matériel. C'est donc le seul mode de transfert de chaleur qui peut se propager dans le vide.

Le rayonnement thermique est un phénomène de surface.



**Figure I.3 :** Exemple de transfert de chaleur par rayonnement

Loi fondamentale du rayonnement est la loi de STEFAN-BOLTZMAN (1879)

$$Q_r = S \cdot \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{STEFAN - BOLTZMAN} \quad (1.3)$$

Avec :

$Q_r$  : flux de chaleur échangé par rayonnement entre corps 1 et 2

$\sigma$  : la constante de Boltzmann =  $4.88 \cdot 10^{-8}$  Kcal / h.m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>

S : surface du corps 1

$\varepsilon$  : facteur qui tient compte des facteurs d'émissivité des deux corps et des géométries relatives. Pour un corps noir  $\varepsilon = 1$

### I.2.2 La Température

C'est une variable d'état qui, caractérise le degré d'agitation de particules. La température d'un corps est la mesure de son agitation moléculaire. Au niveau macroscopique cette agitation c'est simplement l'énergie thermique. Plus connue sous le nom de chaleur.

### I.2.3 La Chaleur

La chaleur est une forme d'énergie qui s'écoule sous l'effet d'une différence de température des hautes vers les basses températures.

#### *\*Remarques sur la notion de chaleur*

- La chaleur est une énergie, c'est un gain d'énergie thermique qui se traduit par une augmentation de l'agitation thermique, ou la perte d'énergie qui se traduit par une diminution de cette agitation.

- L'amplitude des oscillations d'un atome autour de sa position moyenne augmente avec la température. Donc plus l'énergie thermique (chaleur) augmente plus sa mesure (température) augmente.

### I.2.4 Différence entre la température et la chaleur

Dans le langage courant, les mots chaleur et température ont souvent un sens équivalent : *Quelle chaleur !* Est une expression qui veut dire que la température est élevée.

Toutefois, en physique, chaleur et température sont deux notions bien différentes, qui sont cependant liées par le fait que c'est la différence de température entre 2 points d'un système, qui est responsable du déplacement de la chaleur.

On peut aussi exprimer la relation entre chaleur et température en disant qu'un ensemble de 2 corps est en équilibre thermique lorsque ces 2 corps sont à la même température, c'est-à-dire n'échangent plus de chaleur.

Nous verrons aussi que les unités ne sont pas les mêmes

- Températures  $T$  en °C ou K.
- Chaleur  $Q$ , en J ou la calorie (cal) ( $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$ ).

### I.2.5 Quelques définitions thermodynamique

#### I.2.5.1 Capacité Calorifique et Chaleur Latente

D'une manière résumée :

- *La chaleur massique* d'un corps (solide ou gazeux) est associée à une variation de la température de ce corps sans changement d'état. Suivant que la masse de ce corps sera exprimée en kg ou en mol les formules à appliquer seront différentes.
- *La chaleur latente* d'un corps (solide ou gazeux) est associée à un changement d'état de ce corps (passage d'une phase à l'autre), ce changement étant considéré à température constante. Il y a pour un corps donné autant de chaleurs latentes différentes qu'il y a de possibilités de changement de phase.

### I.2.5.1.1 Capacités calorifiques

#### *I.2.5.1.1.a Capacité calorifique massique ou Chaleur Massique (c)*

La capacité calorifique massique, qui est aussi nommée la chaleur massique, est déterminée par la quantité d'énergie à apporter pour élever d'un degré la température de l'unité de masse d'une substance lors d'un échange thermique.

Chaleur massique d'un corps homogène de masse **1 kilogramme** dans lequel l'apport d'une quantité de chaleur de **1 joule** produit une élévation de température thermodynamique de **1 kelvin**.

La chaleur apportée est dite chaleur sensible car elle ne sert qu'à varier la température et non à un changement de phase.

L'unité du système international est donc le joule par kilogramme kelvin, ( $\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) mais la capacité calorifique massique peut aussi être exprimée en :

$$\text{cal. K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$\text{J. K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

Exemple pour l'eau :

$$c = 1 \text{ cal. K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$c = 4,186 \text{ J. K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$c = 4186 \text{ J. K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

#### *I.2.5.1.1.b Capacité calorifique molaire (c')*

La chaleur massique (capacité thermique massique) est définie pour la quantité de matière exprimée en masse. Quand la quantité de matière s'exprime en moles (principalement pour les gaz), on utilise la notion de capacité thermique molaire.

La capacité calorifique molaire ( $c'$ ) est déterminée par la quantité d'énergie à apporter pour élever d'un degré la température **d'une mole** d'une substance lors d'un échange thermique.

Cette valeur étant fonction de la température et de la pression, les capacités thermiques molaires sont exprimées en précisant si on parle capacité thermique à **volume** constant ou à **pression** constante.

Cette grandeur est encore appelée chaleur spécifique ou chaleur molaire.

Capacité calorifique molaire ( $c'$ ), elle s'exprime en :  $\text{cal. K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$  ou  $\text{J. K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

### *1.2.5.1.1.b.1 Capacités calorifiques des gaz*

On considère en plus pour les gaz 2 capacités calorifiques, qui sont différentes pour un même gaz :

- La capacité calorifique à volume constant.
- La capacité calorifique à pression constante.

#### ➤ **Capacité calorifique à volume constant**

On la détermine en mesurant la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température du gaz de 1 degré lorsqu'il est contenu dans un récipient fermé non dilatable. On la note avec l'indice v : Soit  $c_v$  pour 1 g de gaz ou  $c_v'$  pour une mole de gaz.

#### ➤ **Capacité calorifique à pression constante**

De la même manière on va définir  $c_p$  et  $c_p'$ ,  $c_p$  correspond à la quantité de chaleur pour élever 1 g de gaz de 1 degré à pression constante, et  $c_p'$  la quantité pour 1 mole de gaz à pression constante.

Pour les gaz parfaits il y a une relation entre  $c_p'$  et  $c_v'$  :

$$R = c_p' - c_v' \quad (\text{avec } R : \text{constante molaire des gaz parfait} = 8,32 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}).$$

Par ailleurs pour les gaz parfaits le ratio  $c_p'/c_v'$  est connu :

$$\text{Monoatomiques} : \gamma = c_p'/c_v' = 5/3 \quad (c_p' = 5 \text{ cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1}; c_v' = 3 \text{ cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1})$$

$$\text{Diatomiques} : \gamma = c_p'/c_v' = 7/5 \quad (c_p' = 7 \text{ cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1}; c_v' = 5 \text{ cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1})$$

#### **Exemples :**

Gaz monoatomique He :  $c_v' = 3 \text{ cal. K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$  et  $c_p' = 5 \text{ cal. K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

Pour l'air :  $c_v' = 20,9 \text{ J. K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$  et  $c_p' = 29,2 \text{ J. K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

### *1.2.5.1.1.b.2 Capacités calorifiques des solides et des liquides*

Dans le cas des liquides et des solides, les capacités calorifiques à pression constante ou à volume constant seront égales à cause de leur relative incompressibilité :  $c_v = c_p = c$

#### ➤ **Capacité calorifique des liquides**

Il n'existe pas de théories rigoureuses qui donnent les variations des capacités calorifiques. On remarque que lorsque la température augmente le produit de  $M \times c$  ( $M =$  masse molaire) tend vers une limite voisine de 6,4.

Pour l'eau :  $c = 1 \text{ cal g}^{-1} \text{ K}^{-1} = 4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

### ➤ Capacité calorifique des solides

Pour les solides, il existe de nombreuses théories. On remarque que comme pour les liquides on retrouve la même limite :  $M \times c = 6,4$  ( $M$  = masse molaire).

Métaux à l'ambiante  $c_p' = c_v' = 25 \text{ J. K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

$C$  (capacité calorifique d'un corps) =  $m \times c$  ( $c$  : chaleur massique du corps de masse  $m$ ) =  $n \times c_p'$  ( $c_p'$  : chaleur molaire de ce corps à pression constante, et  $n$  le nombre de moles constituant la masse  $m$ ).

### I.2.5.1.2 Chaleur latente : quantité de chaleur liée à un changement d'état

La quantité de chaleur qu'il faut fournir (ou prendre) à la masse  $m$  du corps (ou qu'elle cède) pour que ce corps change d'état, ce changement se fait à température constante :

$$Q = m \times L \quad (\text{I.4})$$

$L$  : est la chaleur latente.

Il y a bien entendu plusieurs chaleurs latentes en fonction de l'état initial et de l'état final du corps considéré ( $L_f$  pour fusion,  $L_v$  pour vaporisation etc...).

#### Exemple :

$L$  pour l'eau :  $L_f = 80 \text{ cal g}^{-1}$ ,  $L_v = 535 \text{ cal g}^{-1}$  (sous 1atm).

#### Remarque :

- Pour les corps purs, les changements d'état s'effectuent à température fixe, sous pression donnée.
- Les changements de phase correspondent à des changements d'organisation des atomes ou des molécules.

### I.2.5.2 Mesure de l'énergie thermique

Si l'on place dans une enceinte deux corps A et B de températures différentes, ils évoluent vers un équilibre thermique et la quantité de chaleur reçue par l'un est égale à la quantité de chaleur cédée par l'autre. Le point d'équilibre est atteint lorsque les deux corps ont atteint la même température.

## Chapitre I : Introduction

---

Pour calculer la quantité d'énergie thermique emmagasinée dans une substance, on utilise la relation suivante :

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (I.5)$$

$Q$  : représente la quantité d'énergie (J) ;

$m$  : représente la masse de la substance (g) ;

$\Delta T$  : représente la variation de température ( $\Delta T = T_f - T_i$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$c$  : représente la chaleur spécifique ou la capacité calorifique massique de la substance (J /Kg.  $^{\circ}\text{C}$ ) ;

$m \times c = C$  : la capacité calorifique du corps de masse  $m$  (en J/ $^{\circ}\text{C}$ ), est la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de  $1^{\circ}\text{C}$ . Cette capacité thermique est définie comme le produit de la masse du corps par sa chaleur spécifique.

### I.2.5.3 Enthalpie

C'est une quantité reliée à l'énergie d'un système thermodynamique. Elle est notée  $H$  (en **KJ/Kg**). Elle comprend l'énergie interne du système ( $U$ ), à laquelle est ajouté le produit de la pression ( $P$ ) par le volume ( $V$ ) :

$$H = U + PV \quad (I.6)$$

Pour les processus effectués à pression constante, la variation d'enthalpie correspond à la chaleur absorbée (ou dégagée) pour rester à température constante :

$$\Delta H = Q_p = \Delta U + P\Delta V \quad (I.7)$$

La loi de conservation de l'énergie est la base du bilan thermique. Il y a égalité entre l'énergie apportée et l'énergie distribuée.

**CHAPITRE II**

**COMBUSTIBLES  
ET ENERGIE  
DE COMBUSTION**

# Chapitre II : COMBUSTIBLES ET ENERGIE DE COMBUSTION

## II.1 Introduction

Depuis que l'homme a su les déclencher et les maîtriser, les phénomènes de combustion lui ont permis d'assurer sa survie (chauffage, éclairage, alimentation) puis d'accéder à la civilisation industrielle. Dans notre monde moderne, la combustion vive du charbon, des hydrocarbures ou d'autres produits organiques permet le fonctionnement des foyers domestiques et industriels et des différents types de moteurs utilisés eux-mêmes pour le transport terrestre, fluvial, maritime et aérien, ou encore pour l'agriculture.

Dans toutes les applications, la chaleur des fours, des sécheurs et des chaudières est produite par combustion ou par électricité. Cette chaleur est ensuite transmise au produit pour qu'il réponde aux exigences préalablement spécifiées. Il peut s'agir du chauffage du métal à une température précise, de la fusion complète du métal sans surchauffage, de l'évaporation de l'eau pour obtenir un séchage à un pourcentage spécifique ou de la transformation complète de calcaire en chaux.

Le développement de la société industrielle moderne et la sauvegarde de l'environnement se fondent sur la maîtrise de cette réaction de combustion.

## II.2 Définitions

### II.2.1 Combustion

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  $1000^{\circ}\text{C}$ ) 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.

### II.2.2 Réaction de combustion

Est une réaction chimique qui a lieu lors de la combinaison d'une substance appelée **combustible** avec l'oxygène appelé **comburant**, pour former de nouvelles espèces chimiques appelées produits de combustion (gaz brûlés ou fumées).

En d'autres termes, la combustion est une réaction chimique d'oxydation d'un combustible par un comburant. Cette réaction produit essentiellement un grand dégagement de chaleur (réaction exothermique). Celle-ci ne peut s'amorcer qu'en présence d'une **énergie de démarrage**, c'est la source de chaleur.

Les trois éléments, **combustible - comburant - énergie de démarrage**, forment le **triangle de feu** (Figure II.1).

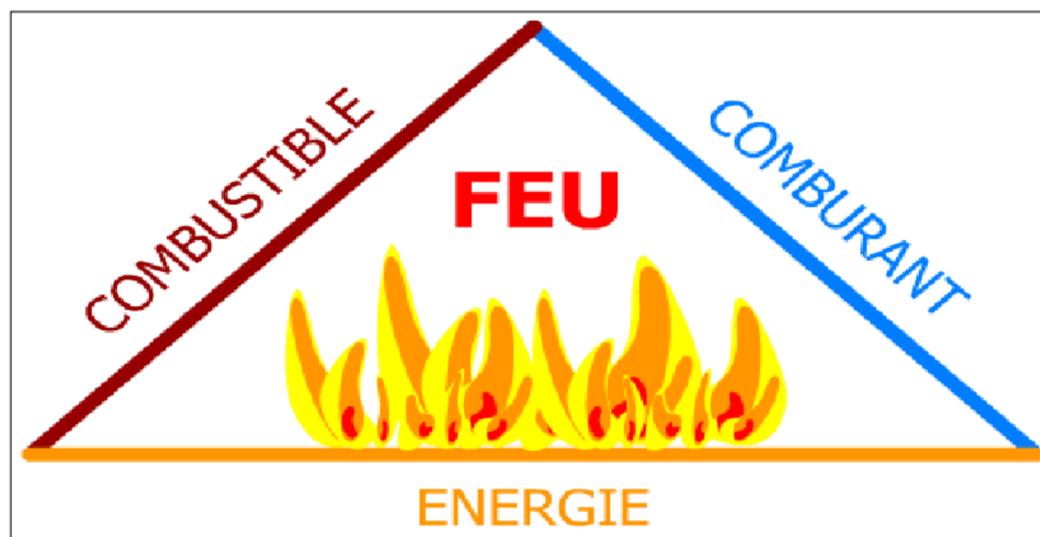
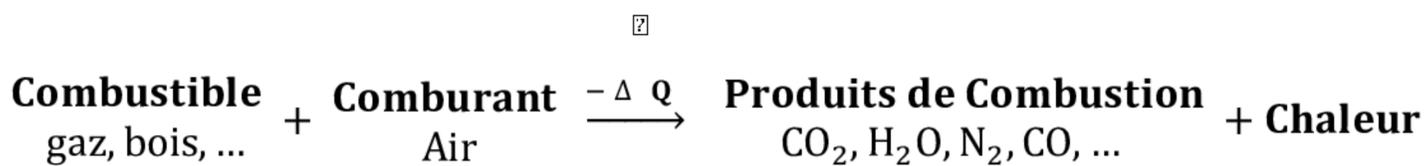
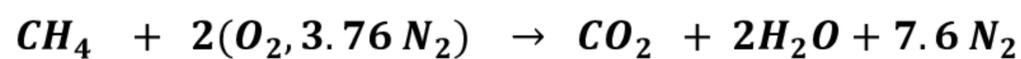
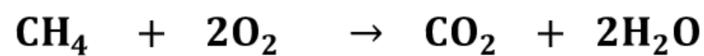


Figure II.1 : Triangle de feu



Dans l'exemple de la combustion du méthane, l'équation de la réaction est la suivante :



## Chapitre II : Combustibles et Energie de Combustion

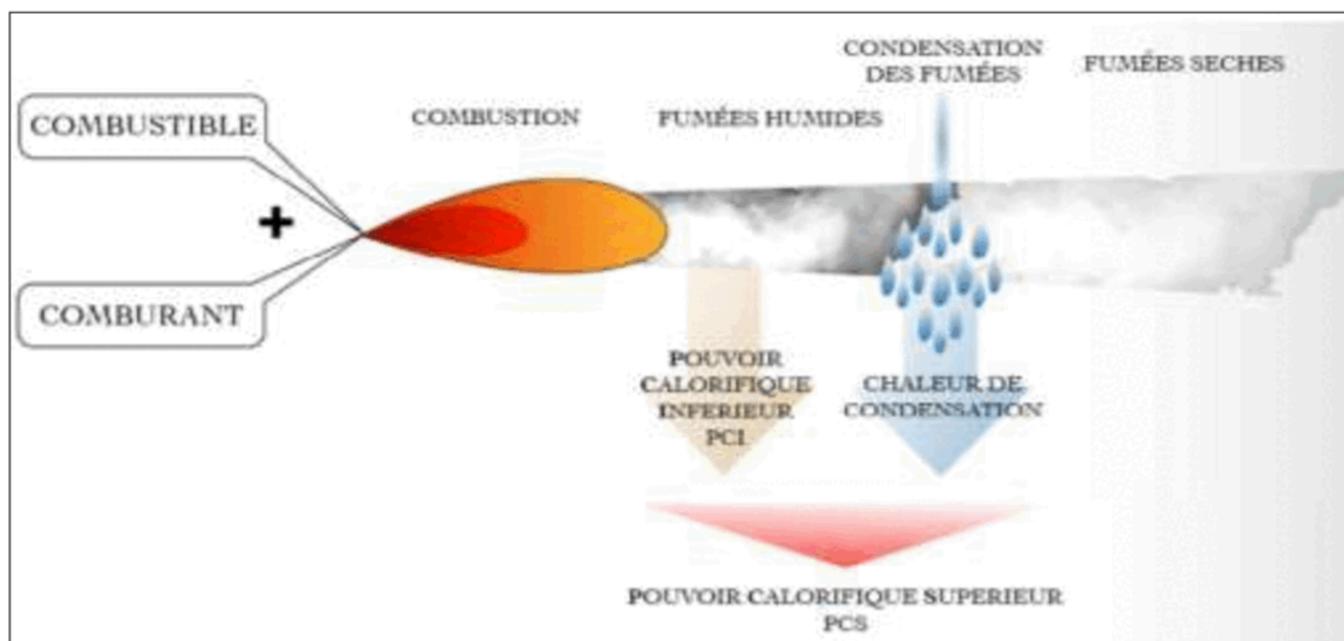
---

### *Exemple de combustion* : Moteur à combustion interne

La combustion, pour se faire, requière trois paramètres :

- un combustible (pour l'automobile, le carburant)
- un comburant (pour l'automobile l'oxygène de l'air)
- une source de chaleur (pour l'automobile l'étincelle de la bougie ou la pression dans la chambre de combustion).

L'énergie de démarrage est très variable, elle peut être flamme, étincelle, frottement, choc, réaction chimique (fermentation), ....



**Figure II.2** : Schéma de la réaction de combustion

### II.2.3 Combustible

(Ou agent réducteur), c'est la substance qui peut brûler en présence d'un comburant (l'oxygène) par une réaction d'oxydation générant de la chaleur.

Les combustibles sont multiples (fioul, pétrole, gaz, charbon...), mais ils ont un point commun, celui de contenir principalement des hydrocarbures, combinaisons multiples de carbone et d'hydrogène.

Ils contiennent en quantités variables des éléments combustibles : comme le carbone, l'hydrogène, le soufre et des éléments non combustibles : comme l'azote, l'oxygène, l'humidité (A) et les cendres (W). Il existe trois familles de combustibles : solide, liquide et gaz.

### Composition et exemples de combustibles

La composition des combustibles varie selon le producteur et/ou l'utilisateur et prend une importance particulière lors du calcul de la chaleur produite, de la quantité d'air requis et de la composition des fumées.

#### ➤ **Combustibles Solides**

Tous les combustibles solides contiennent de la matière organique (C, H, O), sont d'origine végétale à l'exception des propergols (carburants pour fusées). L'uranium et les autres corps radioactifs, qui produisent de l'énergie par fission nucléaire, ne sont pas des combustibles au sens précis du terme car, lors de leur utilisation, ils ne participent à aucune réaction de combustion.

*Exemples de combustibles solides* : le bois, papier, carton, tissu, la tourbe (roche organique constituée de 60% de charbon), le lignite (une roche sédimentaire composée de restes fossiles de plantes. Le lignite est un charbon composé de 65 à 75 % de carbone), la houille (combustible solide minéral constitué de 95% de charbon), etc.

#### ➤ **Combustibles Liquides**

On retrouve dans les combustibles liquides une variété presque infinie d'hydrocarbures, à longue chaîne de carbone.

Ces combustibles proviennent généralement du pétrole, qui est un mélange d'hydrocarbures, c'est-à-dire de composés à base de carbone C et d'hydrogène H, par exemple l'essence, le mazout, etc.

#### ➤ **Combustibles Gazeux**

Mélange d'hydrocarbures gazeux avec éventuellement de l'azote et/ou du dioxyde de carbone. Exemples : gaz naturel, butane, propane, méthane, dihydrogène, fumée, etc.

Quelle que soit la nature du combustible, la réaction de combustion proprement dite ne peut avoir lieu que lorsque les réactifs sont sous forme gazeuse.

Si le combustible n'est pas à l'état gazeux, il se vaporise ou se sublime préalablement (éventuellement après décomposition chimique).

### II.2.4 Comburant

Ou corps chimique contenant l'agent oxydant, c'est la substance qui permet la combustion d'un combustible. Le comburant le plus utilisé est le dioxygène ( $O_2$ ) appelé plus communément l'oxygène, contenu dans l'air ambiant que nous respirons au quotidien, (dans l'air, le comburant c'est le dioxygène, le diazote est considéré comme inerte).

#### *Nature et composition de l'air comburant :*

Le comburant est l'air atmosphérique dont la composition est la suivante :

Oxygène :	$O_2$	Dioxyde de carbone :	$CO_2$
Azote :	$N_2$	Gaz rares :	Néon, Krypton...

En combustion, pour déterminer les quantités d'air théoriques, on utilise les pourcentages suivants :

	% en Masse	% en Volume
$O_2$	23	21
$N_2$	77	79

*L'azote* : Constitue le fond interne du combustible, dans les conditions normales du chauffage l'azote ne participe pas à la combustion.

### II.3 Produits de combustion (fumées)

Les produits de combustion (fumées) sont constitués de :

#### *Principalement*

1. Dioxyde de carbone :  $CO_2$
2. Vapeur d'eau :  $H_2O$
3. Azote :  $N_2$

#### *Eventuellement*

4. Oxyde de soufre :  $SO_2$
5. Oxygène :  $O_2$
6. Monoxyde de carbone :  $CO$
7.  $NO_x$  :  $NO$ ,  $NO_2$

## Chapitre II : Combustibles et Energie de Combustion

8. Hydrogène libre :  $H_2$

9. Imbrûlés solides ou gazeux.

La présence et le pourcentage de ces constituants présents dans les produits de combustion permettront :

a) De définir le type de combustion

b) D'envisager les risques potentiels :

- d'asphyxie pour les personnes

- de corrosion du matériel (chaudière, conduit de fumées)

- de pollutions atmosphériques

c) D'affiner les réglages du brûleur et d'améliorer les rendements.

### II.4 Les différents types de combustion

La réaction de combustion peut être incomplète ou complète

#### II.4.1 La combustion incomplète

Lorsque la combustion se fait avec une arrivée d'oxygène insuffisante, on parle de combustion incomplète. Celle-ci se traduit par la production d'imbrûlés ou d'éléments partiellement oxydés comme le monoxyde de carbone (CO), très dangereux pour la santé.

Voici la représentation d'une combustion incomplète, de deux combustibles fossiles :

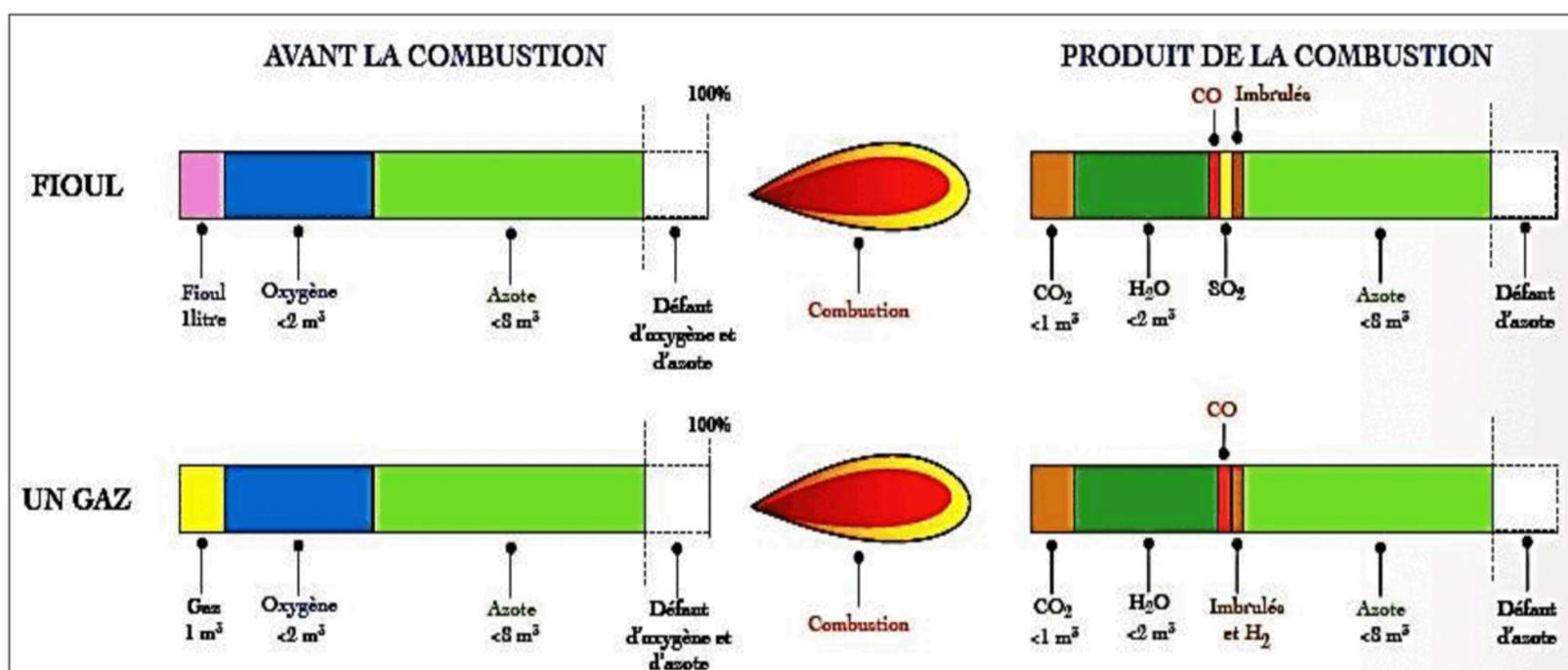


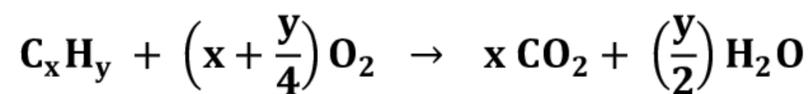
Figure II.3 : Exemples d'une combustion incomplète des combustibles fossiles

### II.4.2 Combustion complète

On appelle combustion complète une combustion où tout le combustible est oxydé. Les fumées ne contiennent aucun élément oxydable.

Lorsqu'il y a assez de dioxygène, la combustion est complète, c'est-à-dire que l'oxydation des éléments chimiques du combustible est menée à son terme.

Lorsqu'il s'agit d'un hydrocarbure, à titre d'exemple, le carbone est entièrement oxydé en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et l'hydrogène en eau (H<sub>2</sub>O), qui selon les conditions de pression et de température, pourra être sous forme liquide ou vapeur.



La combustion totale du carbone est donnée, quant à elle, par la réaction suivante :



Il est à noter qu'une combustion complète produit plus d'énergie (transférée sous forme de chaleur) qu'une combustion incomplète.

### II.4.3 La combustion stœchiométrique

La combustion est dite stœchiométrique (neutre ou théorique) lorsque il y a exactement assez de comburant pour oxyder totalement le combustible. Les fumées ne contiennent ni oxygène, ni combustible. La Combustion Stœchiométrique : complète sans excès ni défaut d'air.

Le dégagement de chaleur est alors maximum.

L'équation d'une combustion stœchiométrique est donnée comme suit :



## Chapitre II : Combustibles et Energie de Combustion

Voici la représentation d'une combustion parfaite ou stœchiométrique, de deux combustibles fossiles :

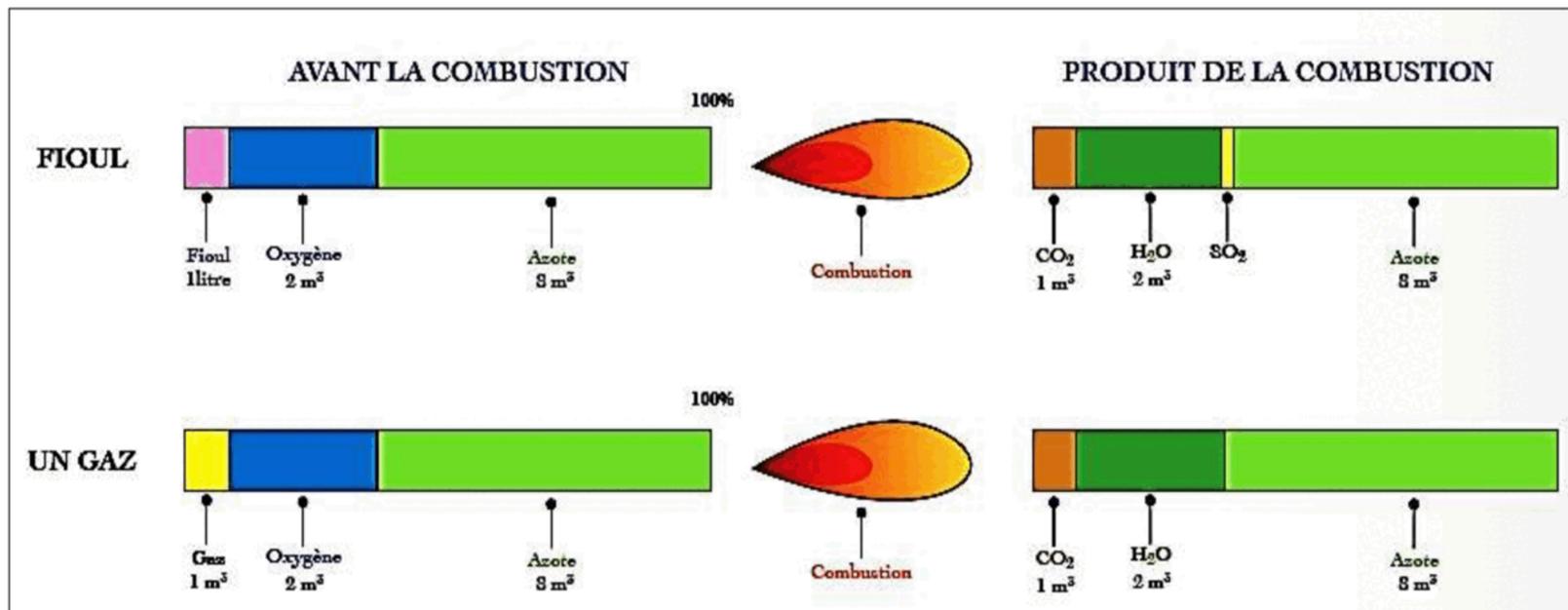


Figure II.4 : Exemples d'une combustion stœchiométrique

### II.4.4 La combustion réelle

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 :

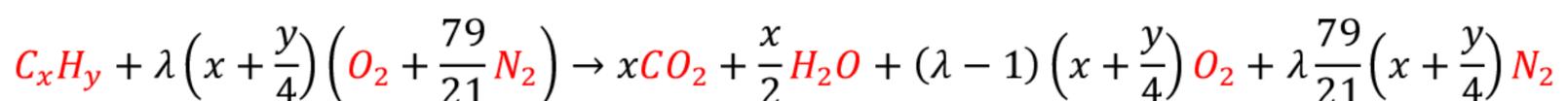
- La combustion en excès d'air
- La combustion en défaut d'air

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

#### II.4.4.1 La combustion complète oxydante ou en excès d'air

Lorsque la combustion se fait avec un excès d'oxygène, la combustion est alors complète mais **oxydante**. Celle-ci se traduit par un fort excès d'oxygène et d'azote dans le produit de combustion, (une partie de l'air comburant est utilisé pour l'oxydation du combustible, l'autre partie se retrouvant dans les fumées).

L'équation de la combustion avec excès d'air s'écrit :



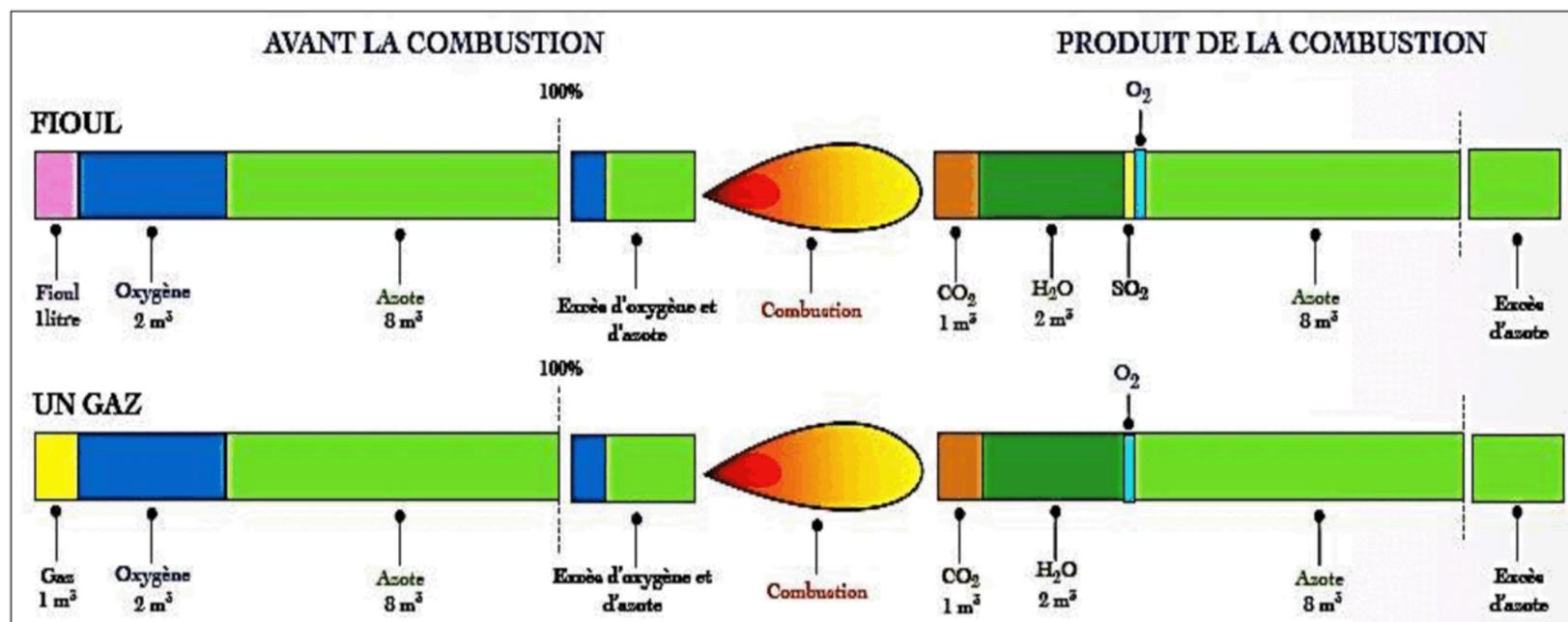


Figure II.5 : Exemples d'une combustion en excès d'air

#### II.4.4.2 La combustion réductrice

La combustion est dite **réductrice** ou **en défaut d'air** si le volume d'air admis pour la combustion de l'unité de combustible est inférieur au volume d'air stœchiométrique; l'oxygène y est néanmoins totalement utilisé donc pas de présence d'O<sub>2</sub> dans les fumées, mais il y a formation de monoxyde de carbone (CO).

### II.5 Equations chimiques de base

La combustion du carbone C, de l'hydrogène H et du soufre S, donne lieu aux équations chimiques de base suivantes :

#### Combustion du carbone



#### Combustion de l'hydrogène



#### Combustion du soufre



$\Delta H_0$  : est appelée chaleur de réaction.

### Exemples de la réaction de combustion

Combustion du carbone :  $C + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{chaleur}$

Combustion de l'hydrogène :  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{chaleur}$

Combustion du soufre :  $S + O_2 \rightarrow SO_2 + \text{chaleur}$

Combustion du méthane :  $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + \text{chaleur}$

## II.6 Caractéristiques de la combustion

### II.6.1 Seuils de démarrage

Pour qu'une combustion soit possible, il est nécessaire de se situer dans la plage d'inflammabilité et également d'avoir atteint certains seuils de température qui se définissent comme suit :

- **Point d'éclair** : c'est la température minimale à laquelle un combustible, liquide ou solide, commence à émettre (produit) des vapeurs susceptibles de former avec l'air un mélange dont l'inflammation se produit au contact d'une petite flamme utilisée comme amorce.

- **Point feu** : c'est la température minimale à laquelle un liquide ou un solide combustible commence à émettre des vapeurs susceptibles de former avec l'air un mélange dont l'inflammation se produit au contact d'une petite flamme utilisée comme amorce et se maintient malgré le retrait de la flamme amorce. Autrement dit la température pour laquelle la combustion une fois amorcée peut continuer.

- **Point d'auto-inflammation** : c'est la température à laquelle un combustible en présence de comburant s'enflamme spontanément sans apport extérieur de chaleur, dans l'atmosphère normale. Il est supérieur au point d'inflammation qui est à son tour supérieur au point d'éclair.

### II.6.2 Propagation

La propagation se fait par plusieurs modes :

- **Convection** : c'est un transfert de chaleur s'effectuant de bas en haut par l'intermédiaire de gaz et de liquides, par vagues ou courants. La fumée chaude est un bon exemple de convection. 65% de la chaleur produite par une combustion est transportée en partie haute par convection.

- **Rayonnement** : c'est un mode de propagation de l'énergie, sans support matériel, à partir du centre d'émission d'un corps chaud. 35% de la chaleur produite par une combustion est diffusée par rayonnement.

- **Conduction** : c'est le transfert de chaleur s'effectuant par l'intermédiaire de matière solide, le transfert s'effectuant du chaud vers le froid.
- **Projection** : le feu se propage également par le déplacement de solide, de liquide ou de gaz.

### II.7 Thermodynamique de la combustion

Une réaction chimique peut se faire soit à volume constant ou à pression constante :

#### II.7.1 Combustion à volume constant (isochore)

Dans ce cas, il n'y a pas d'échange de travail entre le système et le milieu extérieur. Ainsi, la quantité de chaleur sera égale à la variation de l'énergie interne entre l'état initial et l'état final :

$$Q_v = \Delta U = U_2 - U_1 \quad (\text{II. 1})$$

#### II.7.2 Combustion à pression constante (isobare)

La quantité de chaleur sera dans ce cas, égale à la variation de l'enthalpie entre l'état initial et l'état final :

$$Q_p = \Delta H = H_2 - H_1 \quad (\text{II. 2})$$

Etant donné que pour les réactions de combustion, la différence entre  $Q_v$  et  $Q_p$  est négligeable, on préfère travailler à pression constante.

#### II.7.3 Enthalpie standard de formation

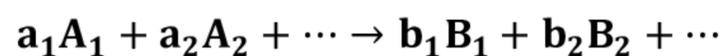
L'énergie interne, comme l'enthalpie, n'est définie qu'à une constante additive près ; aussi choisit-on des conditions arbitraires de température et de pression pour lesquelles on attribue, par convention, une enthalpie nulle à certains corps (plus souvent, il s'agit de corps formés d'une seule sorte d'atomes). On choisit, le plus souvent, pour cet état de référence, les conditions standards (pression 1bar, et une température de 25°C). Dans ces conditions, l'enthalpie standard de formation  $\Delta H_f^\circ$  d'un corps est définie comme la différence entre l'enthalpie standard du corps et l'enthalpie standard des substances élémentaires à partir desquelles il est formé. Cette enthalpie peut être déterminée par des mesures ou par des calculs faisant appel à la thermodynamique statique.

**Tableau II.1 :** Enthalpie standard de quelques espèces chimiques T = 298 K

Espèces chimiques	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> COOH	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	C
ΔH <sub>f</sub> <sup>o</sup> (KJ/mole)	0	-393.5	-487.0	-285.0	0	0

#### II.7.4 Chaleur de la réaction dans les conditions standards

Dans une réaction chimique, si les réactifs sont pris dans l'état standard, la chaleur de réaction Q<sub>p</sub> est appelée enthalpie standard de la réaction et notée ΔH<sub>r</sub><sup>o</sup>.



L'enthalpie standard de la réaction est donnée par la loi de Hess :

$$Q_P = \Delta H_r^o = \sum_i a_i \Delta H_f^o(A_i) - \sum_i b_i \Delta H_f^o(B_i) \quad (\text{II.3})$$

#### II.7.5 Chaleur de la réaction à une température quelconque

L'enthalpie est une fonction d'état de sorte que sa variation ne dépend pas du cycle de transformations choisi entre l'état initial et l'état final. Dans la pratique, il faudra donc trouver une suite de transformations qui s'adapte bien aux données.

Pour une réaction chimique s'effectuant à une température différente de la température standard T<sub>0</sub>, l'enthalpie de la réaction ΔH<sub>r</sub>(T) est donnée par l'expression suivante :

$$\Delta H_r(T) = \Delta H_r(T_0) + \sum_{\text{Produits formés}} \int_{T_0}^T C_p dT - \sum_{\text{Réactifs}} \int_{T_0}^T C_p dT \quad (\text{II.4})$$

#### II.7.6 La chaleur de combustion

On appelle « chaleur de combustion » à pression constante d'un corps simple ou d'un composé chimique définie le nombre de calorie dégagé par la combustion avec l'oxygène d'une partie de ce combustible égale à une unité de masse. La combustion a lieu à la pression normale de 760mmHg avec le combustible, l'oxygène, les fumées pris à la température initiale de 0°C, et l'eau produite par la combustion totalement condensée.

### II.8 Calcul et grandeurs de combustion

La combustion est un processus au cours duquel les constituants d'un combustible, aptes à brûler, se combinent avec l'O<sub>2</sub> en dégageant de la chaleur.

Le calcul de la combustion est important surtout pour la construction ainsi que pour l'étude et le contrôle des fours et les chaudières.

#### II.8.1 Pouvoirs calorifiques d'un combustible

C'est la quantité de chaleur produite par la combustion totale d'une quantité unitaire de combustible. La quantité d'énergie produite par la combustion est exprimée en joules (J); il s'agit de l'enthalpie de réaction. Dans les domaines d'application (fours, brûleurs, moteurs à combustion interne, lutte contre incendie), on utilise souvent la notion de pouvoir calorifique, qui est l'enthalpie de réaction par unité de masse de combustible ou l'énergie obtenue par la combustion d'un kilogramme de combustible, exprimée en général en kilojoule par kilogramme (KJ/Kg). Les combustions d'hydrocarbures dégagent de l'eau sous forme de vapeur. Cette vapeur d'eau contient une grande quantité d'énergie. Ce paramètre est donc pris en compte de manière spécifique pour l'évaluation du pouvoir calorifique, et l'on définit :

##### II.8.1.1 Le pouvoir calorifique supérieur (PCS)

Quantité d'énergie dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée condensée et la chaleur récupérée, (dans ce cas l'eau qui résulte de la combustion est supposée ramenés à l'état liquide dans les produits de combustion).

##### II.8.1.2 Le pouvoir calorifique inférieur (PCI)

Quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée non condensée et la chaleur non récupérée, (l'eau qui résulte de la combustion est supposée à l'état vapeur dans les produits de combustion).

La différence entre le PCI et le PCS est la chaleur latente de vaporisation de l'eau  $L_v$ , qui vaut à peu-près 2250 KJ/Kg (cette dernière valeur dépend de la pression et de la température), multipliée par la quantité de vapeur produite (m).

### II.8.1.3 Relation entre les pouvoirs calorifiques PCI et PCS

On a la relation :

$$\text{PCS} = \text{PCI} + m_{\text{H}_2\text{O}} \times L_v \quad \text{II. 5)}$$

Avec : PCS, PCI en **KJ/Kg** de combustible, **KJ/m<sup>3</sup>** de combustible ou **Kcal/Kg** de combustible.

$L_v$  : est la chaleur d'évaporation de l'eau en **Kcal/Kg**.

On désigne les constituants d'un combustible par leurs lettres minuscules représentant ainsi leur masse ou volume dans un mélange d'1kg ou d'1 Nm<sup>3</sup> (normal mètre cube).

Ainsi :

c : fraction de carbone du combustible

h : fraction d'hydrogène du combustible

s : fraction de soufre du combustible

n : fraction d'azote du combustible

o : fraction d'oxygène du combustible

w : fraction d'eau (ou en humidité) du combustible

En fraction :  $h + c + o + n + s + w + \dots = 1$

Quand le combustible ne contient ni eau, ni hydrocarbure, ni hydrogène, on a :

$$\text{PCS} = \text{PCI} \quad \text{(II. 6)}$$

Dans le cas contraire, lorsque le combustible contient l'eau, et un hydrocarbure, hydrogène, on a :

$$\text{PCS} = \text{PCI} + (9 \cdot h + w) \cdot L_v \quad \text{(II. 7)}$$

En pourcentage :  $H + C + W + \dots = 100$

D'où :

$$\text{PCS} = \text{PCI} + \frac{(9 \cdot H + W)}{100} \cdot L_v \quad \text{(II. 8)}$$

Avec :

H = teneur (%) en H<sub>2</sub> et W = teneur (%) en humidité.

## Chapitre II : Combustibles et Energie de Combustion

---

Expérimentalement, le pouvoir calorifique supérieur est déterminé en brûlant un combustible dans un calorimètre.

Plusieurs formules sont proposées pour le calcul de ce pouvoir

- Pour les combustibles **solides** ou **liquides** à **faible teneur** en **hydrogène** ou **oxygène** tel que la coke et l'anhracite, on a par exemple la formule de Dulong :

$$\text{PCI} = 8100. c + 2500. s + 29000. \left( h - \frac{o}{8} \right) - 600. w \quad \text{II. 9)}$$

- Pour les combustibles **solides** à **teneur élevée** en **hydrogène** ou **oxygène**, ainsi que pour les huiles lourdes, on utilise la formule empirique de WONDRAČEK :

$$\text{PCI} = \left( 7860 + 280. \sqrt[4]{1 - c_0} \right) c + 2500. s + 21800. \left( h - \frac{o}{8} \right) - 600. w \quad \text{II. 10)}$$

$c_0$  : désigne la teneur du carbone du combustible pur (exempt d'humidité et de cendres).

Pour les combustibles **gazeux**, on a :

$$\text{PCI} = \sum_{j=1}^n a_j \text{PCI}_j \quad \text{II. 11)}$$

$a_j$  : Teneur du constituant  $j$  dans le combustible

$\text{PCI}_j$  : Pouvoir calorifique inférieur du constituant  $j$

$$\text{PCI} = 2580 h + 3050 c_o + 8530 c h_4 + 17000 \sum C_m H_p \quad \text{II. 12)}$$

### II.8.2 Etude des paramètres caractéristiques de la combustion théorique

La combustion théorique est une réaction du combustible avec l'oxygène de l'air dans les conditions stœchiométriques.

En réalité, aucune combustion ne peut se faire de façon stœchiométrique, car une combustion réelle se fait avec un excès d'air ou un défaut d'air. Les paramètres qui caractérisent un combustible sont :

### II.8.2.1 Le pouvoir comburivore

C'est le volume ou la masse d'air (en Nm<sup>3</sup> ou Kg) strictement nécessaire et suffisant qu'il faut fournir pour assurer la combustion théorique ou neutre de l'unité de combustible (un kg de combustible solide ou liquide ou un Nm<sup>3</sup> de combustible gazeux).

On le note  $V_a$  pour le volume et  $\alpha_a$  pour la masse.

#### Unités :

[Nm<sup>3</sup> d'air / Nm<sup>3</sup> de combustible]

[Nm<sup>3</sup> d'air / Kg de combustible]

[Kg d'air / Nm<sup>3</sup> de combustible]

[Kg d'air / Kg de combustible]

#### Relation :

$$V_a = V_{O_2} + V_{N_2} \quad \text{II. 13)}$$

$V_{O_2}$  : Volume d'oxygène nécessaire

$V_{N_2}$  : Volume d'azote

### II.8.2.2 Pouvoir fumigène

C'est la quantité de fumées (en Kg ou Nm<sup>3</sup>) produites par la combustion neutre ou théorique d'une unité de combustible (Kg ou Nm<sup>3</sup>) (un Kg de combustible solide ou liquide ou un m<sup>3</sup>N de combustible gazeux). On le note  $V_f$  pour le volume et  $m_f$  pour la masse.

Il existe deux types de pouvoir fumigène :

- Le pouvoir fumigène sec noté  $V_{fs}$

- Le pouvoir fumigène humide noté  $V_{fh}$

#### Relations :

Pouvoir Fumigène sec :  $V_{fs} = V_{N_2} + V_{CO_2}$  II. 14)

Pouvoir Fumigène humide :  $V_{fh} = V_{N_2} + V_{CO_2} + \underline{V_{H_2O}}$  II. 15)

### II.8.2.3 Autres expressions des pouvoirs comburivore et fumigène

#### II.8.2.3.1 Cas des combustibles solides et liquides

La composition en masse d'un combustible est donnée par : c, h, n, o, s, d. Parmi ces constituants, ne participent à la combustion que c, h et s. Ainsi, on aura au cours de la combustion d'un tel combustible consommation d'eau.

En écrivant les réactions de combustion et en remarquant que l'azote N<sub>2</sub> ne s'oxyde pas aux températures où a lieu la combustion (se comporte comme un corps neutre), on détermine le pouvoir comburivore :

$$\left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32}\right) \text{ Kmol d'O}_2 \text{ la quantité de matière}$$

21 % d'O<sub>2</sub> pour 79 % de N<sub>2</sub>

$$V_a = \frac{100V_{O_2}}{21} = \frac{V_{O_2}}{0,21} = 4,76 \times V_{O_2}$$

Or

$$V_{O_2} = n_{O_2} V_m = \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32}\right) \text{ Kmol} * 22,414 * 10^{-3} \text{ m}^3 / 10^{-3} \text{ Kmol}$$

$$V_{O_2} = \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32}\right) \times 22,414 \text{ Nm}^3$$

$$V_a = \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32}\right) \times 22,414 \times 4,76 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$$

$$V_a = 8,89 c + 26,6 h + 3,33 (s - o) \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kg}} \quad (\text{II. 16})$$

$$G_i = \frac{x_i M_i}{\sum x_i M_i}$$

$$G_{O_2} = \frac{0,21 \times 32}{(0,21 \times 32) + (0,79 \times 28)} = 0,23$$

## Chapitre II : Combustibles et Energie de Combustion

---

Le pouvoir comburivore théorique est noté  $\alpha_0$  et est exprimé en kg d'air par kg de combustible.

$$\alpha_0 = \frac{1}{23} \times \left( \frac{8}{3}C + 8H + S - O \right) \quad \text{II.17)}$$

C, H, S et O représentent les teneurs en % du combustible en carbone, en hydrogène, en soufre et en oxygène.

Pour éviter que la proportion d'imbrûlés ne soit pas trop grande, on introduit une quantité d'air  $\alpha_a$  supérieure à la valeur théorique  $\alpha_0$ .

Cette quantité  $\alpha_a$  représente le pouvoir comburivore réel.

Le pouvoir fumigène  $V_f$  est égal au volume de produit de réaction plus la quantité d'azote pris à l'air atmosphérique.

$$V_f = \left[ \left( \frac{c}{12} + \frac{h}{2} + \frac{s}{32} + \frac{n}{28} \right) + 3,76 \times \left( \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s-o}{32} \right) \right] \times 22,44$$

$$V_f = 8,89 c + 32,27 h + 3,33 s + 0,8 n - 2,63o \quad \text{Nm}^3/\text{Kg} \quad \text{II.18)}$$

$$m_f = 1 - d + \alpha_0 \quad \text{II.19)}$$

Si x est la teneur en cendre du combustible, en écrivant la conservation de la masse, on a :

$$V_f = \alpha_a + 1 - \frac{x}{100} \quad \text{II.20)}$$

### II.8.2.3.2 Cas des combustibles gazeux

#### Pouvoir comburivore

Une mole de gaz carbonique consomme une mole d'oxygène pour se former, de même pour  $\text{SO}_2$ . Pour l'eau, il faut par contre une demi-mole d'oxygène. La quantité d'oxygène nécessaire est donc la somme de ces trois quantités. Il faut retrancher la quantité d'oxygène contenue dans le carburant pour avoir la quantité d'oxygène contenue dans le comburant. Et pour avoir la quantité de comburant complète diviser par  $\Psi$  la teneur en oxygène du comburant.

$$V_a = \frac{1}{\Psi} \left( V_{CO_2} + V_{SO_2} + \frac{V_{H_2O}}{2} - V_{O_2} \right) \quad (\text{II. 21})$$

$\Psi$  : teneur en oxygène du comburant :  $\Psi = 0,21$  pour l'air, entre 0,21 et 1 pour certaines applications industrielles à air suroxygéné et 1 pour l'oxygène.

### Pouvoir fumigène sec

On ajoute le volume des différents gaz contenus dans les fumées sauf la vapeur d'eau.

$$V_{fs} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + (1 - \Psi)V_a \quad (\text{II. 22})$$

### Pouvoir fumigène humide

$$V_{fh} = V_{fs} + V_{H_2O} + V_H \quad (\text{II. 23})$$

La vapeur d'eau provient de la combustion :  $V_{H_2O}$  et de l'humidité du carburant :  $V_H$  est le volume de la vapeur d'eau produite par l'humidité contenue dans le carburant.

### II.8.2.3.3 Exemples de calcul

#### Cas d'un combustible solide ou liquide

Soit un combustible solide de teneur pondérale donnée :

Humidité = 1,2 % ; Cendres = 8% ; C = 78% ; H = 5% ; O = 6,4% ; N = 1,4%

Chaque atome de carbone du combustible pesant 12g forme dans les fumées une mole de gaz carbonique occupant 22,4L sous les conditions normales, chaque atome d'hydrogène du combustible pesant 1g forme dans les fumées une demi-mole d'eau occupant 22,4L sous les conditions normales. Les caractéristiques de la combustion neutre dans l'air seront donc égales à :

$$V_{CO_2} = 0,78 \times \frac{22,4}{12} = 1,456 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$$

$$V_{H_2O} = 0,05 \times \frac{22,4}{2} = 0,56 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$$

$$V_{O_2} = 0,064 \times \frac{22,4}{32} = 0,045 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$$

$$V_{N_2} = 0,014 \times \frac{22,4}{28} = 0,011 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$$

$$\text{Donc : } V_a = \frac{1}{0,21} \left( 1,456 + \frac{0,56}{2} - 0,45 \right) = 8,052 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$$

$$V_{fs} = 1,456 + 0,011 + 0,79 \times 8,052 = 7,83 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$$

$$V_{fh} = 7,83 + 0,56 + \frac{0,012 \times 22,4}{18} = 8,4 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$$

Le calcul est identique pour un combustible liquide sauf que celui-ci peut contenir du soufre. Ce qui diffère, c'est uniquement que la masse atomique de S = 32 au lieu de C = 12.

### Cas d'un combustible gazeux

On connaît ici la composition du mélange en gaz purs (CO, CH<sub>4</sub>...) en volume cette fois :

CH<sub>4</sub> = 81,3% ; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 2,9% ; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> = 0,4% ; C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 0,2% ; N<sub>2</sub> = 14,3% ; CO<sub>2</sub> = 0,9%

$$V_{CO_2} = 1 \times 0,813 + 2 \times 0,029 + 3 \times 0,004 + 4 \times 0,002 + 0,009 = 0,9 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$V_{H_2O} = 2 \times 0,813 + 3 \times 0,029 + 4 \times 0,004 + 5 \times 0,002 = 1,739 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$V_{O_2} = 0,009 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$V_{N_2} = 0,143 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$V_a = \frac{1}{0,21} \left( 0,9 + \frac{1,739}{2} - 0,009 \right) = 8,38 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$V_{fs} = 0,9 + 0,143 + 0,79 \cdot 8,38 = 7,67 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$V_{fh} = 7,67 + 1,739 = 9,4 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

Les brûleurs industriels ne permettent pas de réaliser la combustion complète du combustible avec la quantité d'air théoriquement nécessaire (pouvoir comburivore). Il faut leur fournir une quantité d'air supplémentaire que l'on appelle excès d'air. L'excès d'air s'exprime en pour cent de la quantité théorique d'air.

### II.8.3 Paramètres caractéristiques de la combustion réelle

Dans une combustion réelle la réaction peut ne pas être totale ni complète. Elle peut en outre, se faire avec un excès ou un défaut d'air (par rapport à la combustion neutre).

On désignera par « ' » les grandeurs de la combustion réelle :

V'<sub>a</sub> : Le volume d'air réel

V'<sub>fh</sub> : Le volume de fumée dégagé par la combustion réelle...

Les teneurs molaires dans ce cas s'écrivent :

$X_{CO_2} = V'_{CO_2}/V'_{fh}$  : Teneur en  $CO_2$  des fumées

$\gamma_{CO_2} = V'_{CO_2}/V'_{fs}$  : Teneur en  $CO_2$  des fumées sèches

$X_{CO} = V'_{CO}/V'_{fh}$  : Teneur en  $CO$  des fumées

$\gamma_{CO} = V'_{CO}/V'_{fs}$  : Teneur en  $CO$  des fumées sèches

$X_{H_2} = V'_{H_2}/V'_{fh}$  : Teneur en  $H_2$  des fumées

$\gamma_{H_2} = V'_{H_2}/V'_{fs}$  : Teneur en  $H_2$  des fumées sèches...

### II.8.3.1 Facteur d'air

Le facteur d'air ( $\lambda$ ), est le rapport du volume d'air réellement utilisé ( $V'_a$ ) sur le volume d'air théorique ( $V_a$ ) :

$$\lambda = \frac{V'_a}{V_a} \quad (\text{II.24})$$

En combustion stochiométrique  $V'_a = V_a$  donc  $\lambda = 1$

En combustion oxydante (en excès d'air)  $V'_a > V_a$  donc  $\lambda > 1$

En combustion réductrice (en défaut d'air)  $V'_a < V_a$  donc  $\lambda < 1$

**Exemple :** Un brûleur au gaz consomme  $11,88 \text{ Nm}^3$  d'air par  $\text{Nm}^3$  de gaz. Son pouvoir comburivore est de  $9,9 \text{ Nm}^3$ . Calculer son facteur d'air.

$V'_a = 11,88 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$  de gaz

$V_a = 9,9 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$  de gaz

$$\lambda = \frac{V'_a}{V_a} = \frac{11,88}{9,9} = 1,2$$

### II.8.3.2 Excès d'air

L'excès d'air ( $E_a$ ) est le rapport du volume d'excès d'air ( $V_{ea}$ ) sur le volume d'air théorique ( $V_a$ ) :

$$E_a = \frac{V_{ea}}{V_a} \quad (\text{II.25})$$

Or, la relation entre le facteur d'air  $\lambda$  et l'excès d'air  $E_a$

$$\lambda = \frac{V'_a}{V_a} = \frac{V_a + V_{ea}}{V_a} = 1 + \frac{V_{ea}}{V_a} = 1 + E_a \quad (\text{II. 26})$$

### II.8.3.3 Défaut d'air

Le défaut d'air est le rapport du volume de défaut d'air ( $V_{da}$ ) sur le volume théorique ( $V_a$ ).

$$D_a = \frac{V_{da}}{V_a} \quad (\text{II. 27})$$

$$\text{on a } \lambda = \frac{V'_a}{V_a} = \frac{V_a - V_{da}}{V_a} = 1 - \frac{V_{da}}{V_a} = 1 - D_a$$

$$\text{D'où } \lambda = 1 - D_a \quad \text{et} \quad D_a = 1 - \lambda \quad (\text{II. 28})$$

### II.8.4 Combustion oxydante

Dans le cas de valorisation énergétique du combustible, le comburant est toujours en excès pour éviter le gaspillage d'énergie. Dans ce cas, sauf dysfonctionnement, la combustion du combustible est quasi complète, c'est-à-dire que les imbrulés ne sont qu'à l'état de traces et n'influent pas sur le calcul. Le problème est en général de calculer l'excès d'air connaissant les teneurs en oxygène ou en gaz carbonique des fumées.

#### *a) Calcul des teneurs en $CO_2$ , $H_2O$ et $O_2$ connaissant l'excès d'air*

Si la teneur en CO est inférieure à 1%, les teneurs sont très proches de celles de la combustion complète. Le volume d'air réel est égal à :

$$V'_a = \lambda V_a = (1 + E_a) V_a \quad (\text{II. 29})$$

Où  $\lambda$  est le facteur d'air et  $E_a$  l'excès d'air.

Dans ce cas de combustion, le combustible brûlant complètement, le volume réel des fumées est égal au volume des fumées stœchiométrique plus celui de l'excès d'air donc le volume des fumées sèches s'écrit :

$$V'_{fs} = V_{fs} + E_a V_a \quad (\text{II. 30})$$

La teneur en air des fumées sèches est donc :

$$\gamma_a = \frac{E_a V_a}{V'_{fs}} = \frac{E_a V_a}{V_{fs} + E_a V_a} \quad (\text{II. 31})$$

En sachant que la teneur en oxygène des fumées sèches est  $\gamma_{O_2} = \Psi \cdot \gamma_a$ , alors :

$$\gamma_{O_2} = \Psi \gamma_a = \Psi \frac{E_a V_a}{V_{fs} + E_a V_a} \quad (\text{II. 32})$$

Pour le calcul de  $CO_2+SO_2$  :

$$\gamma_{CO_2+SO_2} = \frac{V'_{CO_2+SO_2}}{V'_{fs}} = \frac{V'_{CO_2+SO_2}}{V_{fs} + E_a V_a} \quad (\text{II. 33})$$

Or si la combustion est complète  $V'_{CO_2+SO_2} = V_{CO_2+SO_2}$  donc :

$$\gamma_{CO_2+SO_2} = \frac{V_{CO_2+SO_2}}{V_{fs} + E_a V_a} \quad (\text{II. 34})$$

Pour le calcul des pertes par chaleur latente ou des pertes par imbrûlé, on peut avoir besoin du titre en eau :

$$X_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{fs} + E_a V_a} \quad (\text{II. 35})$$

On verra que le calcul direct par  $V_{H_2O}$  ou  $V_{fs}$  est plus simple.

### ***b) Calcul de l'excès d'air connaissant les teneurs en $O_2$ ou $CO_2$***

Donc en inversant l'équation (II.32) :

$$E_a = \frac{\gamma_{O_2} V_{fs}}{(\Psi - \gamma_{O_2}) V_a} \quad (\text{II. 36})$$

Si l'on ne connaît que la teneur en  $CO_2+SO_2$ , on calcule  $E_a$  en inversant l'équation (II.34) :

$$E_a = \frac{V_{CO_2+SO_2}}{\gamma_{CO_2+SO_2} V_a} - \frac{V_{fs}}{V_a} \quad (\text{II. 37})$$

Cette deuxième méthode est moins précise qu'avec l'oxygène.

### II.9 Qualité de la combustion

#### Le Diagramme d'OSTWALD

Pour caractériser facilement la qualité de la combustion d'une installation, on mesure les taux  $\gamma_{CO_2}$  et  $\gamma_{O_2}$  dans les fumées, à l'aide d'un analyseur de fumées.

Ensuite, le diagramme permet d'obtenir en fonction du  $\gamma_{CO_2}$  mesuré et du  $\gamma_{O_2}$  mesuré :

- 1- Le type de combustion réelle
- 2- Le % d'excès d'air ou de défaut d'air
- 3- Le  $\gamma_{CO}$  (s'il y a lieu)

Il est défini pour un combustible donné, l'axe des abscisses représente le  $\gamma_{O_2}$  et celui des ordonnées représente le  $\gamma_{CO_2}$ . Il comporte en général :

- La droite des combustions oxydantes ( $\gamma_{CO} = 0\%$ ) graduée en excès d'air,
- Une graduation en défaut d'air sur l'axe vertical ( $\gamma_{O_2} = 0\%$ ),
- Le point représentatif de la combustion neutre ( $\gamma_{O_2} = 0\%$  et  $\gamma_{CO} = 0\%$ ) pour  $\gamma_{CO_2max}$ ,
- Les droites d'égale teneur en CO ( $\gamma_{CO} = cte$ ) parallèle à la droite des combustions oxydantes,
- Les droites d'égal excès ou défaut d'air.

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 ( $\gamma_{O_2} < 21\%$ ).

**Exemple :** On mesure  $\gamma_{CO_2} = 11\%$  et  $\gamma_{O_2} = 6\%$  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.

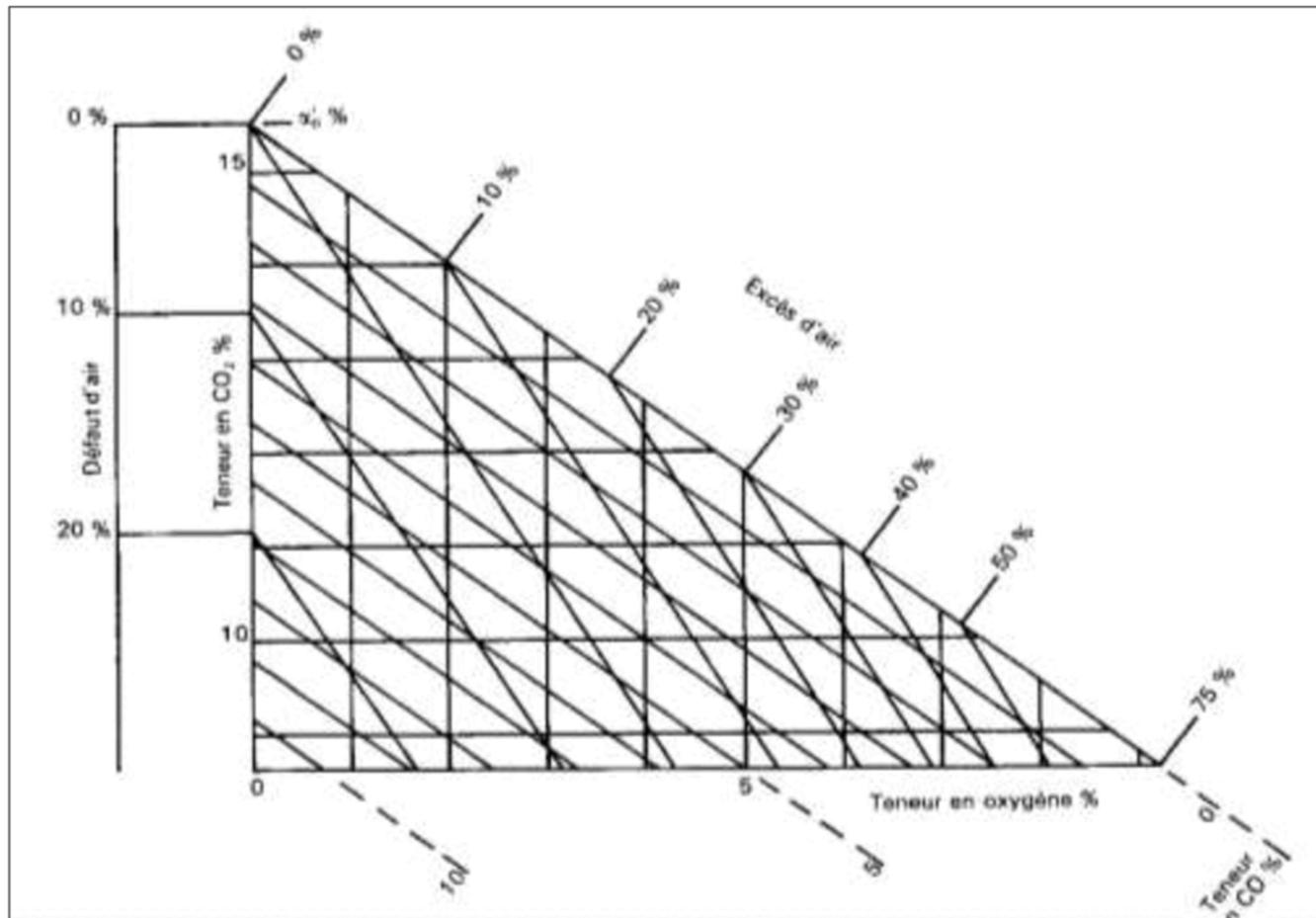


Figure II.6 : Diagramme d'Oswald

### II.10 Les équipements de combustion

L'équipement de combustion est constitué de machines conçues pour brûler une source de combustible en combinaison avec l'oxygène de l'air pour produire de la chaleur et de l'énergie. Les différents types d'équipements de combustion comprennent les fours, les générateurs d'air chaud, les chaudières, les turbines et les moteurs. La conception peut en outre être identifiée par la source de combustible telle que le pétrole, le gaz naturel, le charbon ou le bois.

Un appareil de chauffage, ou appareil de chauffage à combustion directe, est un type d'enceinte fermée dans lequel la chaleur est générée par la combustion d'un type de combustible. Un ventilateur introduit de l'air dans la chambre de chauffage où il est combiné avec le combustible et brûlé.

*Un four* peut être utilisé pour produire de l'énergie thermique pour la chaleur elle-même, converti en énergie mécanique pour conduire un processus, ou en énergie électrique comme dans une centrale électrique. La chaleur générée peut être évacuée du four par des tubes remplis d'eau, d'air ou d'huile caloporteuse.

*Les chaudières* sont des équipements de combustion qui produisent de la vapeur ou de l'eau chauffée pour exécuter des processus industriels ou pour chauffer des bâtiments. Les principaux types de chaudières industrielles sont le tube à eau et le tube à feu. Les chaudières à tubes d'eau font circuler l'eau dans des tubes traversant une chambre de combustion où le combustible est brûlé. La chaleur de combustion passe à travers les parois du tube pour chauffer l'eau et créer de la vapeur. Les chaudières à tubes de fumée envoient les gaz chauds générés par la combustion du combustible dans des tubes traversant une chambre remplie d'eau, où le transfert de chaleur provoque la vaporisation de l'eau en vapeur.

*Les turbines* sont des machines qui créent de l'énergie par la rotation d'aubes ou d'aubes par le mouvement de gaz ou de liquide. Une turbine à gaz utilise un compresseur pour produire de l'air sous pression. La combustion de l'air comprimé mélangé à du carburant génère un gaz à haute pression qui déplace un rotor. Ce type d'équipement de combustion se trouve dans les centrales électriques de plus petite capacité et dans les moteurs à réaction.

*Un moteur à combustion interne* produit de l'énergie en allumant du carburant sous haute pression dans un espace clos. La dilatation de gaz créée par la combustion de carburant est transformée en énergie mécanique pour déplacer un vilebrequin ou un rotor. Ces moteurs entraînent des automobiles, des générateurs électriques, des pompes, des chariots élévateurs à fourche et d'autres machines industrielles.

Divers types de combustibles sont utilisés par différents types d'équipements de combustion. Les produits pétroliers liquides sont les sources de carburant les plus courantes dans les moteurs et les turbines et peuvent inclure l'essence, le kérosène, le diesel et les produits résiduels plus lourds tels que le combustible de soute. Un grand nombre de chaudières, en particulier celles qui produisent de la chaleur dans les bâtiments, fonctionnent au gaz naturel. Les centrales électriques au charbon produisent un pourcentage important de l'énergie utilisée dans le monde. Les fours à bois sont moins courants dans les applications industrielles et sont plus susceptibles d'être utilisés dans des applications résidentielles.

### II.11 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 changement climatique provoqué par le réchauffement de la planète représente l'un des plus grands défis que doivent relever dans 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 un 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. Ces résultats 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 II.2.

**Tableau II.2 :** Emissions engendrées par les systèmes de combustion et leurs effets

Émission	Source	Effet	Potentiel des GES liés au CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> (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 <sub>2</sub> (dioxyde de soufre)	Combustion du soufre contenu dans le combustible	Smog, pluie acide	
NO <sub>x</sub> (oxydes d'azote)	Sous-produit de la plupart des procédés de combustion	Pluie acide	
N <sub>2</sub> O (oxyde nitreux)	Sous-produit de certains procédés de combustion	Réchauffement de la planète	310
COV (composés)	Fuite et évaporation de combustibles liquides (engendrés p. ex. par les	Smog	

## Chapitre II : Combustibles et Energie de Combustion

<b>organiques volatils)</b>	véhicules, les réservoirs de carburant, les pompes à carburant, les raffineries et les solvants des peintures)		
<b>CH<sub>4</sub> (méthane)</b>	Composé principal du gaz naturel; fuite des puits de gaz, des canalisations et des réseaux de distribution	Réchauffement de la planète	21
<b>H<sub>2</sub>O (vapeur d'eau)</b>	Combustion de l'hydrogène contenu dans le combustible	Brouillard localisé	
<b>Particules (poussière, suie, fumées)</b>	Carbone et hydrocarbures non brûlés ou brûlés partiellement; cendres et saletés contenues dans le combustible	Smog	
<b>Éléments traces</b>	Impuretés dans le combustible	Agents carcinogènes potentiels	
<b>Composés halogénés</b>	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

Les émissions de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) contribuent aux pluies acides et par conséquent, posent également un problème. Le contrôle des émissions de SO<sub>2</sub> s'effectue en limitant la concentration en soufre admise dans le combustible, mais la réduction des émissions de NO<sub>x</sub> est possible en modifiant le processus de combustion. On peut trouver les directives concernant les systèmes de chauffage neufs dans le tableau II.3.

## Chapitre II : Combustibles et Energie de Combustion

**Tableau II.3 :** Directives du ccme\* sur les émissions de NO<sub>x</sub> pour les systèmes de chauffage neufs

Capacité d'alimentation	Limite d'émission de NO <sub>x</sub> , g/GJ** et PPM (à 3 % O <sub>2</sub> )***	
	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 distillé	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<sub>x</sub> émis par giga joule d'alimentation en combustible  
 \*\*\* = parties par million par volume, corrigées à 3% O<sub>2</sub> dans les gaz de carneau (10000ppm = 1 %)

Pour corriger les ppm de NO<sub>x</sub> à 3 % O<sub>2</sub> :  $NO_x \text{ à } 3 \% O_2 = [NO_x \text{ mesuré} \times 17,9] \div [20,9 - O_2]$ ,  
 où O<sub>2</sub> est l'oxygène mesuré dans les gaz de carneau, base sèche.

Pour convertir les ppm NO<sub>x</sub> à 3 % O<sub>2</sub> à g/GJ : pour le gaz naturel,  $g/GJ = ppm \div 1,907$ ; pour le mazout,  $g/GJ = ppm \div 1,808$

**Tableau II.4 :** Émissions courantes de NO<sub>x</sub> sans équipement de contrôle de NO<sub>x</sub>

Type de combustible et de chaudière		Émissions courantes de NO <sub>x</sub> (PPM à 3 % O <sub>2</sub> )
<b>Gaz naturel</b>	Tube de fumée	75 - 115
	<b>Tube d'eau préfabriqué</b>	40 - 90
	<b>Tube d'eau sur le site</b>	45 - 105
<b>Huile n<sup>o</sup> 2</b>	Tube de fumées	70 - 140
	<b>Tube d'eau préfabriqué</b>	90 - 150
	<b>Tube d'eau sur le site</b>	40 - 115
<b>Huile n<sup>o</sup> 4</b>	Tube d'eau préfabriqué	160 - 310
	<b>Tube d'eau sur le site</b>	140 - 190
<b>Huile n<sup>o</sup> 6</b>	Tube d'eau préfabriqué	200 - 360
	<b>Tube d'eau sur le site</b>	190 - 330

Bien que les autres GES, pour installation, aient des effets plus puissants que le CO<sub>2</sub>, ce dernier demeure le gaz à effet de serre le plus important en raison de son volume. La plus grande partie des émissions de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>.

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.

**CHAPITRE III**

**LES FOURS**

**INDUSTRIELS**

## **Chapitre III : LES FOURS INDUSTRIELS**

### **III.1 Introduction**

Les fours ont d'abord été chauffés au bois, puis au charbon, au gaz, au pétrole, à l'électricité, et plus récemment par micro-ondes ou à l'énergie solaire.

Dans la plupart des unités pétrolières et gazières l'apport de l'énergie thermique requise par le procédé se fait par l'intermédiaire de fours à chauffage direct dans lesquels l'énergie produite par la combustion est transmise directement au fluide à réchauffer qui circule dans un serpent tubulaire ou un faisceau de tube.

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.

Un four est un outil utilisé pour élever la température d'un produit grâce aux transferts thermiques entre une source de chaleur et la charge (le produit à traiter). Il peut être soit :

- 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).

Un four industriel permet d'obtenir une chaleur intense, obtenue grâce à l'énergie thermique ou électrique. On trouve les fours dans un très grand nombre d'activités industrielles :

- L'industrie sidérurgique ;
- Le traitement thermique des métaux ;
- Le raffinage et de l'industrie chimique ;
- La cimenterie ;
- L'industrie verrière ;
- Les industries céramiques et des produits réfractaires.

### III.2 Classification des fours industriels

On peut citer quatre classifications, en fonction :

- De la manutention (enfournage, défournage) du produit : *fours continus ou discontinus* ;
- Du procédé de chauffage : *fours direct ou indirect* ;
- Du niveau de température : *fours à haute température ou à basse température* ;
- Du combustible : *fours à flamme ou fours à résistance*.

#### III.2.1 Classification selon la manutention du produit

C'est la manutention (enfournage, défournage) et la circulation de la charge qui est ici le critère de classification, on distingue les :

##### III.2.1.1 Fours continus

Dans les fours continus (appelés aussi fours tunnels ou fours à passage), la charge entre à une des extrémités du four et en ressort à l'autre, c.à.d. elle se déplace de façon continue ou pas à pas depuis l'enfournement jusqu'au défournement : la charge traverse le four et le cycle de température est réalisé sur la longueur du four au cours de l'avancement de la charge. Dans un four continu, chaque point du four est à température constante dans le temps. On dit qu'un four continu fonctionne en régime thermique établi. C'est le cas des :

- Fours de réchauffage de semi-produits (fours à longerons et fours poussant) de la sidérurgie ;
- Fours de l'industrie chimique et du raffinage ;
- Fours rotatifs de l'industrie cimentière.
- Fours de l'industrie chimique et du raffinage ;
- Fours rotatifs de l'industrie cimentière.

##### III.2.1.2 Four discontinu

Dans un four discontinu (appelés aussi fours intermittents ou fours à charge), la charge (le produit à chauffer) reste immobile dans le four pendant le traitement entre l'enfournement et le défournement (il est chargé et déchargé au même endroit). Un four discontinu est soumis à un cycle de température variable dans le temps, tout comme la charge : un four discontinu fonctionne en régime thermique variable. C'est le cas des :

- Fours à sole mobile de forge ;

### Chapitre III : Les Fours Industriels

---

- Fours à soles fixes, ou fours à chambre ;
- Fours de traitement thermique ;
- Fours à cloches mobiles et élévateurs ;
- Four à chariot.

**a)** *Les fours à sole fixe, ou four à chambre*, sont les plus simples et les plus classiques de tous les fours, leur fonctionnement est discontinu. Ces fours comprennent généralement plusieurs chambres de cuisson superposées à chauffage indépendant. Ils se rencontrent surtout dans l'industrie mécanique, métallurgiques, électrique, céramique, agroalimentaires ainsi que dans les laboratoires. Le volume de la chambre de chauffe est généralement limité à quelques mètres cube.

**b)** *Les fours à sole mobile* : sont des fours fixe à fonctionnement discontinu dont la sole, chauffée ou non, est mobile et peut être sortie du four, Les opération de chargement et de déchargement sont ainsi facilitées, pour augmenter la productivité d'un four, on peut utiliser deux soles mobile.

**c)** *Les fours à chariot* : les produits à cuire sont placées sur un chariot métallique roulant et introduits dans une étuve à la sole du four peut être fixe ou rotative, cette dernière disposition permettant d'améliorer l'homogénéité de la cuisson.

**d)** *Les fours tunnels* : sont destinées à des productions industrielles importantes, les produits à cuire sont disposés sur un tapis métallique défilant dans un tunnel dont la longueur varie de 10 à 30m. La vitesse de défilement du tapis peut varier en fonction de la nature des produits à cuire.

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.

**NB** : La sole est le plan sur lequel repose la charge à traité.

### III.2.2 Classification selon le procédé de chauffage

C'est le procédé de transmission de la chaleur à la charge qui est le critère de classement. En effet, cette transmission peut avoir lieu par un contact direct entre la charge et les gaz issus de la combustion (chauffage directe) ou bien par une transmission à travers une paroi appelé méthode indirecte, donc on distingue :

#### III.2.2.1 Fours à chauffage direct

Dans ce type de chauffage, l'énergie fournie par la combustion d'un combustible (généralement sous forme gazeux ou sous forme liquide) est transférée directement au produit à réchauffer, sans intermédiaire. 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 peuvent lui être préjudiciables.

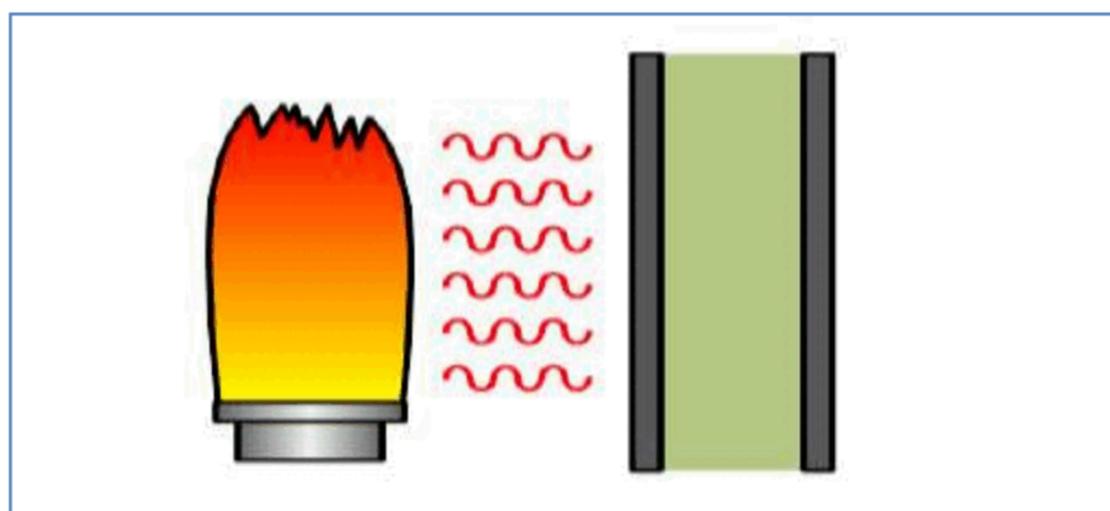
Les réchauffeurs de process directs fournissent de l'énergie calorifique directement au procédé industriel sans utiliser de vapeur ni d'échangeur de chaleur.

Ce sont les appareils dont le tube de flamme est immergé dans le produit. Ce sont les plus simples et les moins chers.

Les réchauffeurs directs sont utilisés lorsque la quantité d'énergie à transférée est très importante :

- Chauffage à haute température.
- Gros débit de produit à réchauffer.

On utilise également des réchauffeurs directs pour réaliser des réactions chimiques catalysées fortement endothermiques, comme par exemple les réactions de reformage ou de craquage.



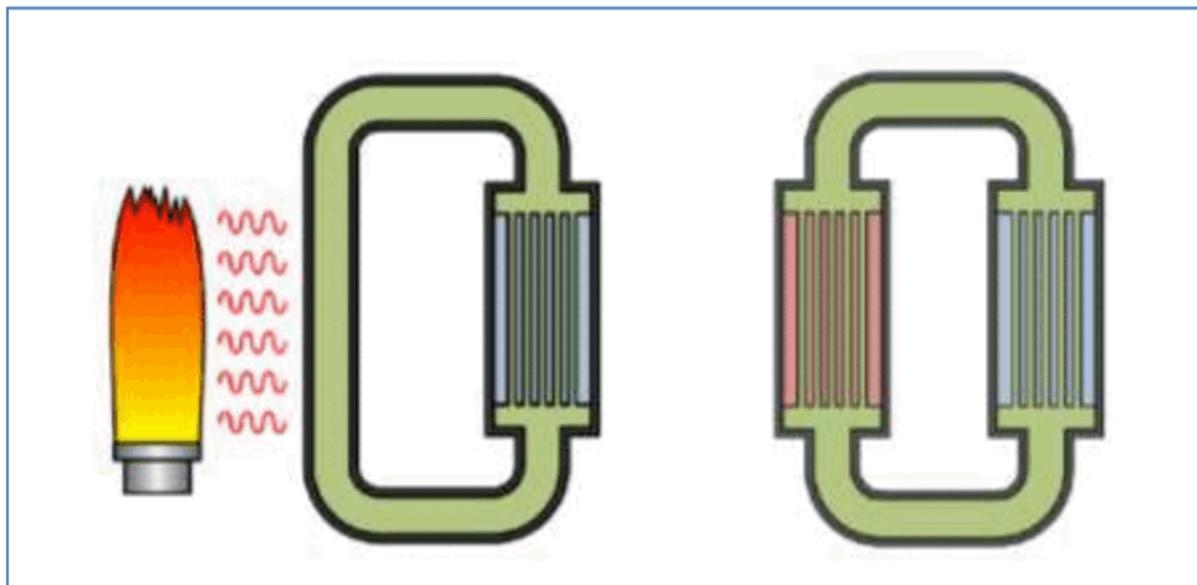
**Figure III.1 : Réchauffeur direct (four)**

### III.2.2.2 Fours à chauffage indirect

Dans un réchauffeur indirect, l'énergie thermique est échangée par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur approprié, généralement de la vapeur d'eau ou de l'huile chaude. Les réchauffeurs indirects sont constitués d'échangeurs thermiques dans lesquels circule ce fluide caloporteur.

L'interaction entre les gaz de combustion et les produits n'existe plus (pour éviter le contact entre les produits et les gaz, on place un écran protecteur). 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.

La principale utilisation des réchauffeurs indirects reste la récupération d'énergie (refroidissement d'un fluide process chaud par transfert thermique vers un fluide plus froid).



**Figure III.2 :** Réchauffeurs indirects (récupération d'énergie à droite)

### III.2.3 Classification selon le niveau de température

Cette classification est plus ou moins arbitraire car une même température peut être considérée comme haute dans un type d'activité et basse dans une autre activité. Par exemple, une température de 700°C est considérée comme haute dans l'industrie chimique et basse en sidérurgie ou dans l'industrie du verre. 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 1000°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 cherche à l'améliorer par mise en circulation des gaz autour du produit.

Exemple : les fours de détensionnement de pièces chaudronnées qui fonctionnent autour de 650°C.

### III.2.4 Classification selon le combustible

On trouvera dans le domaine des fours industriels, avec plus ou moins d'importance selon les activités, toutes les formes d'énergie. En fonction de l'énergie utilisée, on peut classer les fours en deux grandes catégories :

- *Les fours à flammes utilisant des combustibles fossiles* : gaz, liquide ou solide (exemples : gaz naturel, le fuel lourd, les charbons).
- *Les fours électriques* : il s'agit des fours à résistances dans lesquels l'énergie thermique est produite par effet Joule.

Un chauffage d'appoint électrique est souvent installé sur les fours à flammes, soit pour augmenter momentanément la production du four, soit pour améliorer la qualité du produit.

### III.3 Description et composants des fours industriels

Un four est un équipement de transfert thermique. La chaleur générée par une réaction de combustion (combustible + air) au niveau des brûleurs, est destinée à chauffer un produit circulant dans les tubes de four.

Un four est une enceinte métallique calorifugée, revêtu de l'intérieur par un matériau hautement réfractaire (résistance thermique très élevée).

Les conceptions de four varient en fonction leur application, de leur charge de chauffage, du type de combustible utilisé et de la méthode d'introduction d'air de combustion appliquée. Toutefois, tous les fours présentent des caractéristiques communes.

Le four comporte trois zones distinctes physiquement :

### III.3.1 La zone de radiation ou zone de rayonnement

Appelée communément le foyer ou la cellule ou boîte à feu. Les tubes sont placés le long de la paroi interne (selon le type de four) de façon à recevoir en direct la chaleur rayonnante des flammes des brûleurs ainsi que la chaleur réfléchiée par le matériau réfractaire du four. Le mode de transfert thermique est principalement le rayonnement.

### III.3.2 La zone de convection ou carneau : (selon le procédé)

Qui correspond au conduit d'évacuation des fumées vers la cheminée. Habituellement des tubes supplémentaires sont placés dans la zone située entre la chambre de combustion et la cheminée. Les tubes reçoivent leur chaleur des produits chauds de combustion qui circulent autour d'eux. Cette zone est généralement équipée d'un ou de plusieurs séries d'échangeurs thermiques pour refroidir les fumées et récupérer leur énergie thermique au maximum (amélioration du rendement du transfert thermique global). Le transfert thermique se réalise essentiellement par convection.

### III.3.3 La cheminée

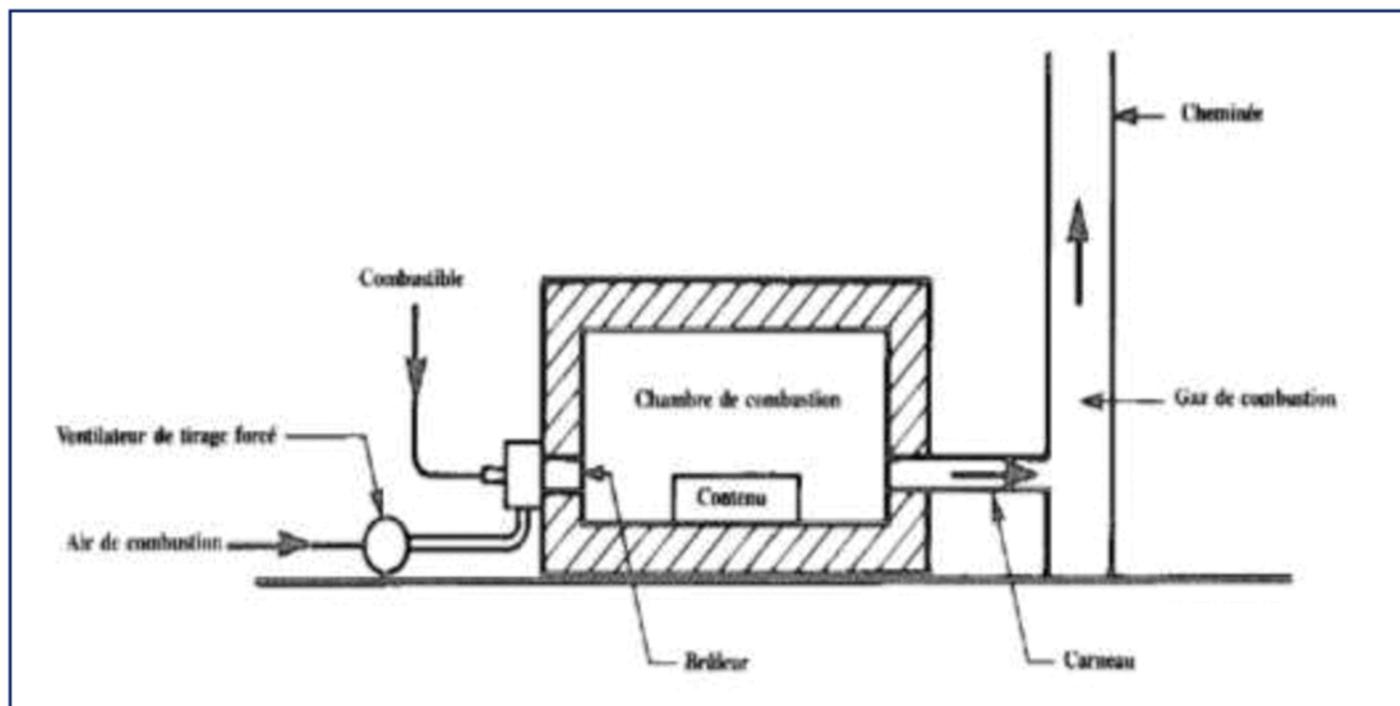
Accomplit deux fonctions :

- Transporter les produits de la combustion pour les disperser dans la couche supérieure de l'atmosphère.
- Créer un tirage de façon à soutenir la combustion.

Les cheminées des fours de raffinerie sont généralement en acier et garnies d'un matériau réfractaire qui les protège contre la chaleur et les fumées corrosifs ou multiples servant à régler le tirage et le rendement des fours.

Le produit qui doit être chauffé pénètre habituellement dans le four par la zone de convection et en ressort par la zone de radiation. La construction des fours diffère en fonction de leur dimension et du rôle qu'ils sont appelés à jouer, mais ils fonctionnent tous selon le même principe de base.

On retrouve les éléments de base d'un four à combustible dans la figure III.3.



**Figure III.3 :** Four à combustible

### *Composants d'un four classique*

Un faisceau tubulaire en zone de radiation et éventuellement en zone de convection.

Une zone de rayonnement formant la chambre de combustion garnie intérieurement de matériau réfractaire isolant.

Une zone de convection éventuellement garnie également.

Un équipement de chauffe comprenant des brûleurs situés à la base ou sur les côtés de la chambre de combustion, avec son appareillage.

Une cheminée ou un carneau pouvant être garnis avec registre.

Les accessoires divers tels que :

Souffleurs de suie éventuels

Portes d'accès, Portes d'explosion, Regards

Opacimètre, analyseurs d'oxygène, déprimomètre

Connexions diverses pour la bonne conduite du four.

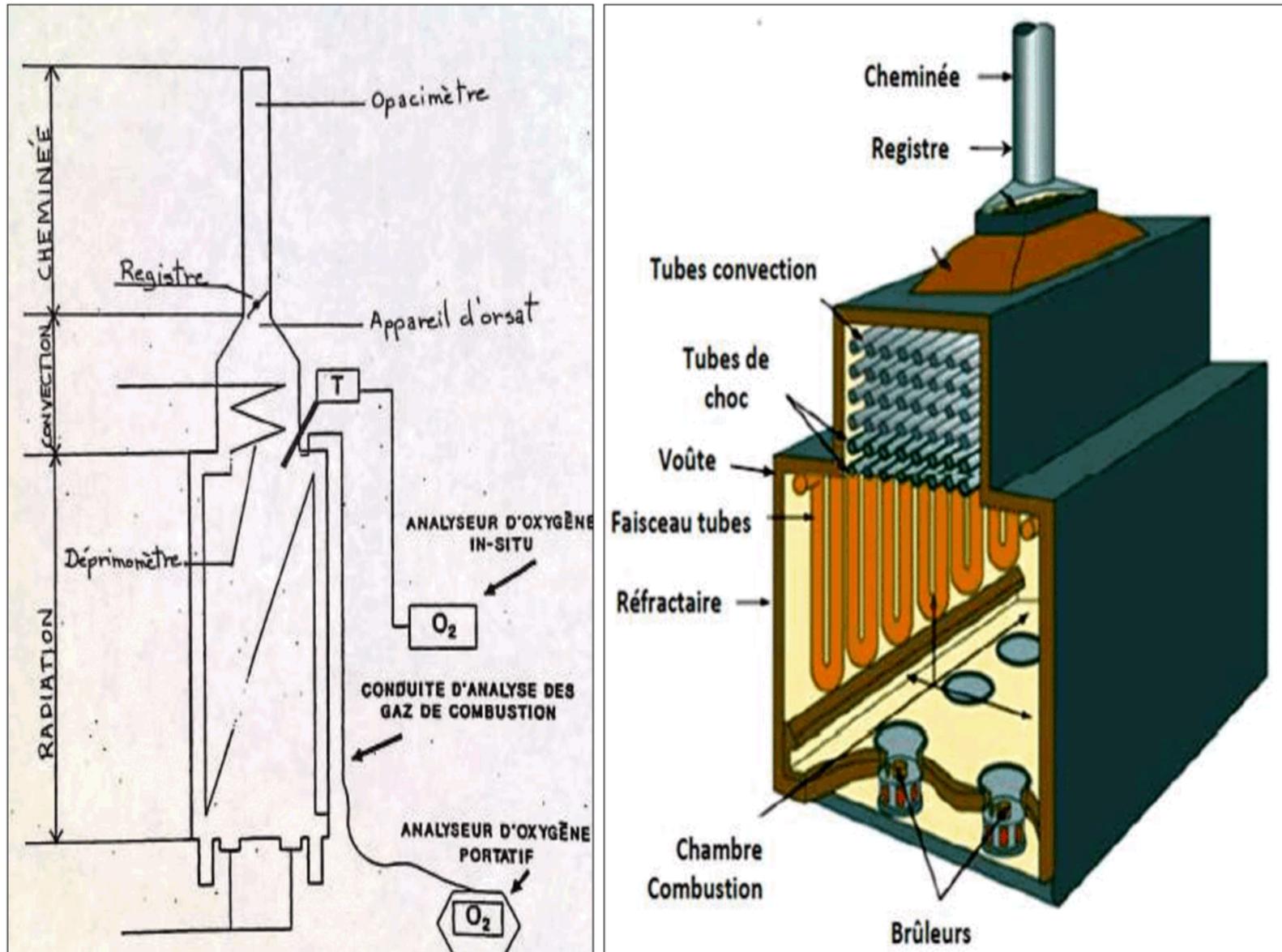


Figure III.4 : Composants des fours

### III.4 Principaux types des fours

Il existe une grande variété de fours tubulaires qui diffèrent notamment par leur géométrie ou selon leur fonction.

#### III.4.1 Selon la géométrie

Deux types principaux :

##### III.4.1.1 Les fours cylindriques verticaux

Dont la plus grande dimension est selon l'axe vertical (voir la figure III.5). Ces fours sont généralement limités en puissance thermique.

Les brûleurs situés sur la sole du four réalisent le mélange air-combustible et la combustion. Les flammes se développent dans la zone de radiation dans laquelle les tubes sont chauffés par rayonnement. Au sommet de la zone de radiation, la température des gaz de combustion est de l'ordre de 700 à 800°C et de ce fait le rayonnement est plus faible.

La récupération de chaleur sur les fumées est poursuivie dans la zone de convection fonctionnant comme un échangeur tubulaire. Les fumées refroidies sont rejetées à l'atmosphère par l'intermédiaire de la cheminée.

Au cours de son trajet dans le faisceau tubulaire, le fluide de procédé parcourt successivement les zones de convection et de radiation.

La charpente métallique et l'enveloppe métallique du four (le casing) sont protégées de la chaleur par une isolation interne réalisée en briques ou béton réfractaires ou encore en fibres céramiques.

Les fours cylindriques verticaux sont caractérisés d'un point de vue géométrique par un axe de symétrie vertical. Pour un four équipé d'un seul brûleur, celui-ci est situé au centre de la sole. Si pour obtenir une puissance thermique élevée plusieurs brûleurs sont nécessaires, ceux-ci sont disposés sur un cercle centré sur l'axe du four.

Selon la puissance thermique du four les dimensions des zones de radiation varient entre 1,5 m et 13 m de diamètre avec des hauteurs allant de 2,5 m à 25 m.

Les puissances thermiques les plus élevées de ces fours sont de l'ordre de 70 000 th/h ce qui correspond à la combustion d'environ 7 t/h de combustible.

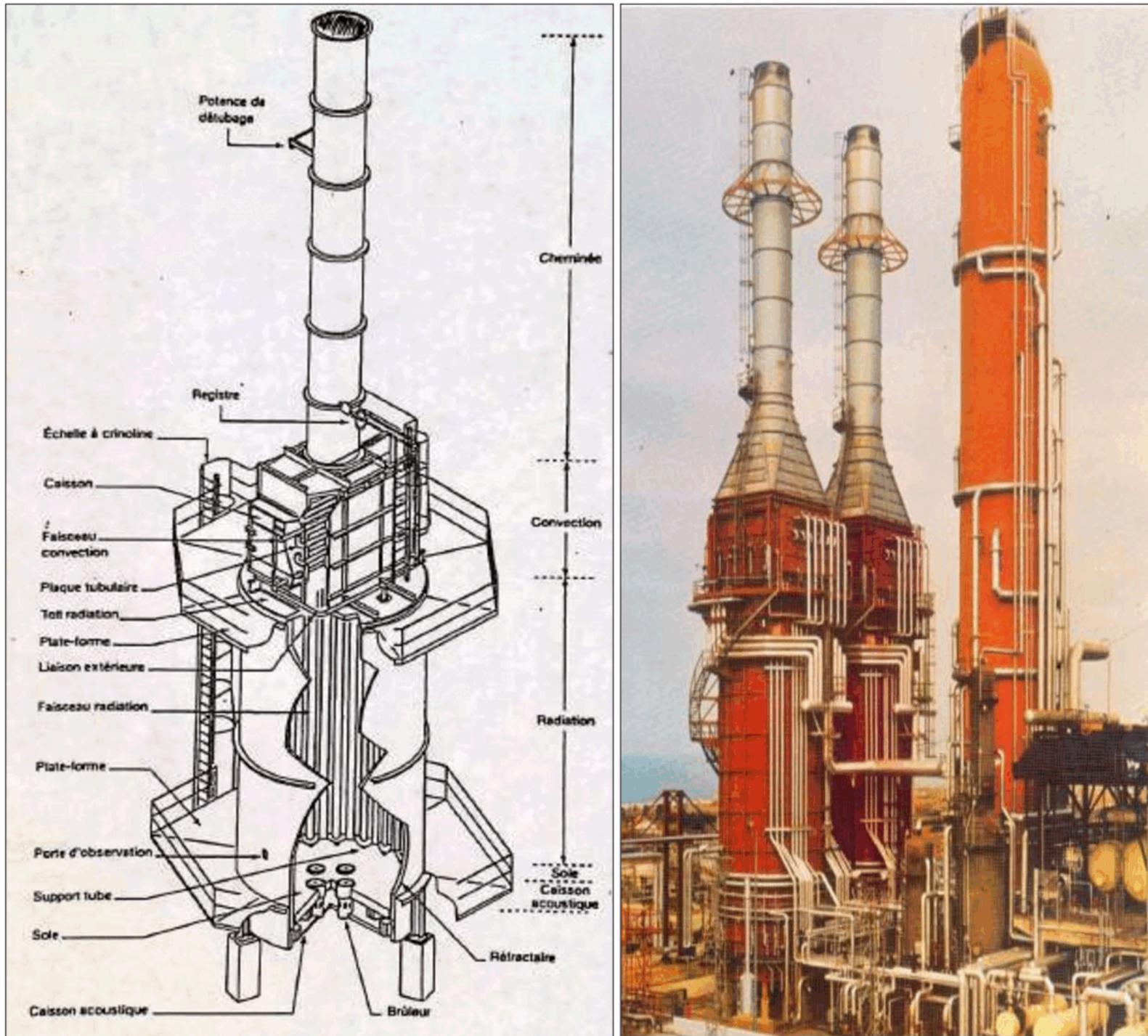


Figure III.5 : Four cylindrique vertical

### III.4.1.2 Les fours cabines

Dont la plus grande dimension est au contraire horizontale.

Ceci leur permet d'atteindre des puissances thermiques de l'ordre de 200 000th/h. Mais la place qu'ils occupent au sol est bien plus grande que pour le four cylindrique.

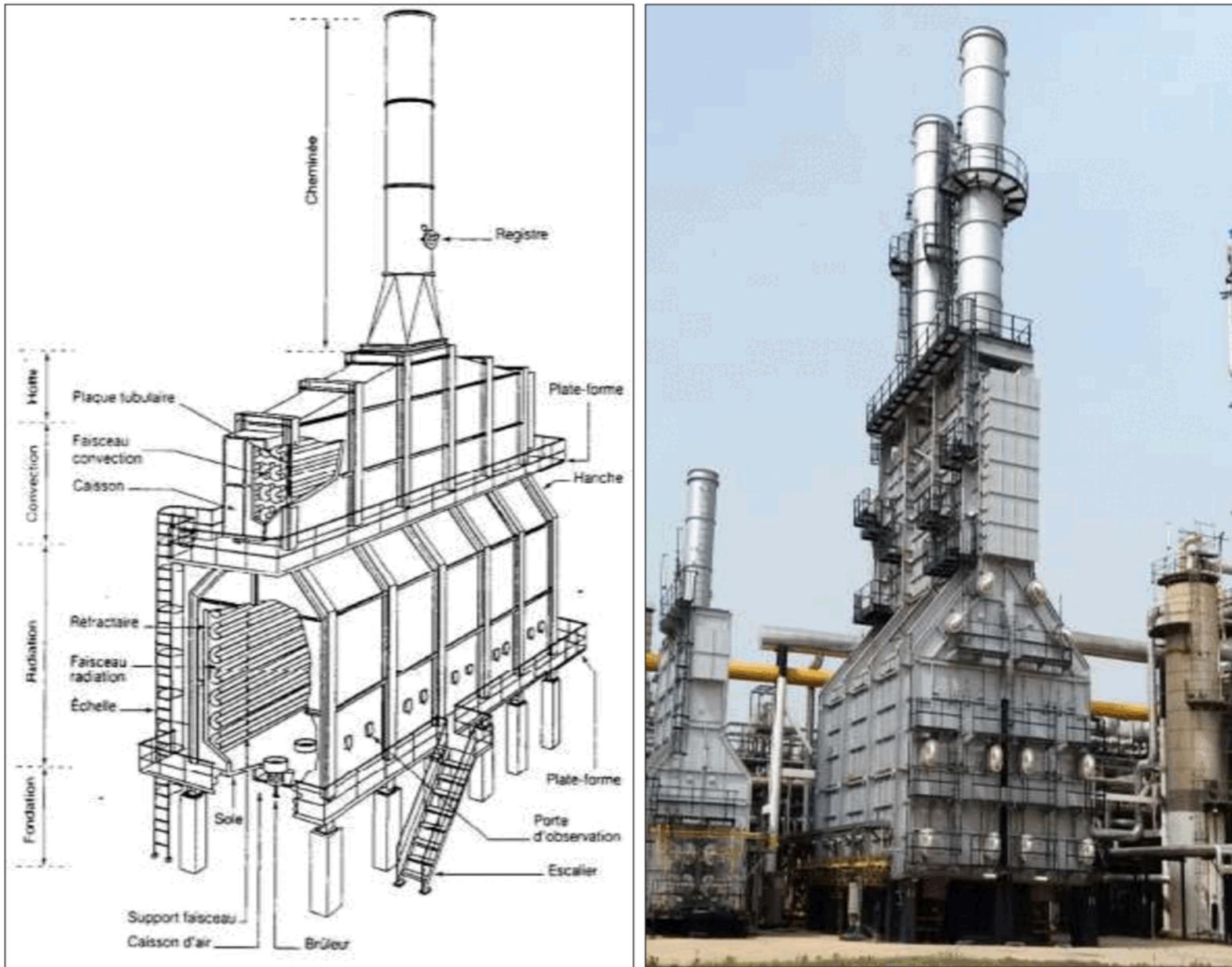


Figure III.6: Four industriel Cabine

III.4.1.2.a Fours cabines à brûleurs sur la sole

La vue ci-dessous présente un exemple de four cabine à tubes horizontaux.

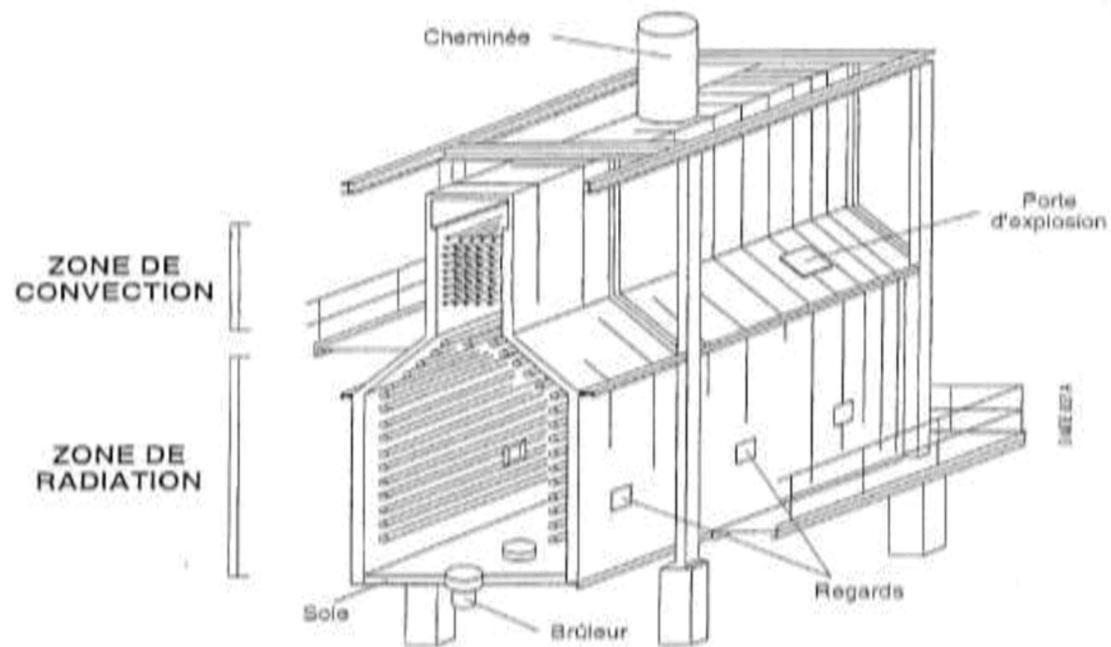
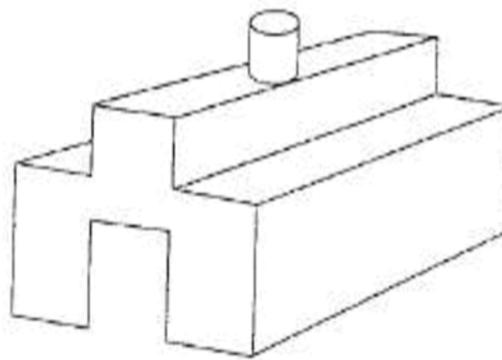


Figure III.7 : Four cabine à tubes horizontaux

Il se distingue essentiellement du four cylindrique par l'existence d'un plan de symétrie ce qui conduit à disposer un grand nombre de brûleurs sur la sole pour réaliser un véritable rideau de flammes dans le plan de la zone de radiation.

La largeur de la zone de radiation est d'environ 6m et la hauteur de 10 à 15m. La longueur du four dépend de la puissance thermique par le nombre de brûleurs qu'il est nécessaire d'installer. Elle peut atteindre 40m.

Dans certains cas, pour limiter la longueur du four on découpe la zone de radiation en deux cellules disposées parallèlement et surmontées d'une zone de convection commune (schéma ci-contre).



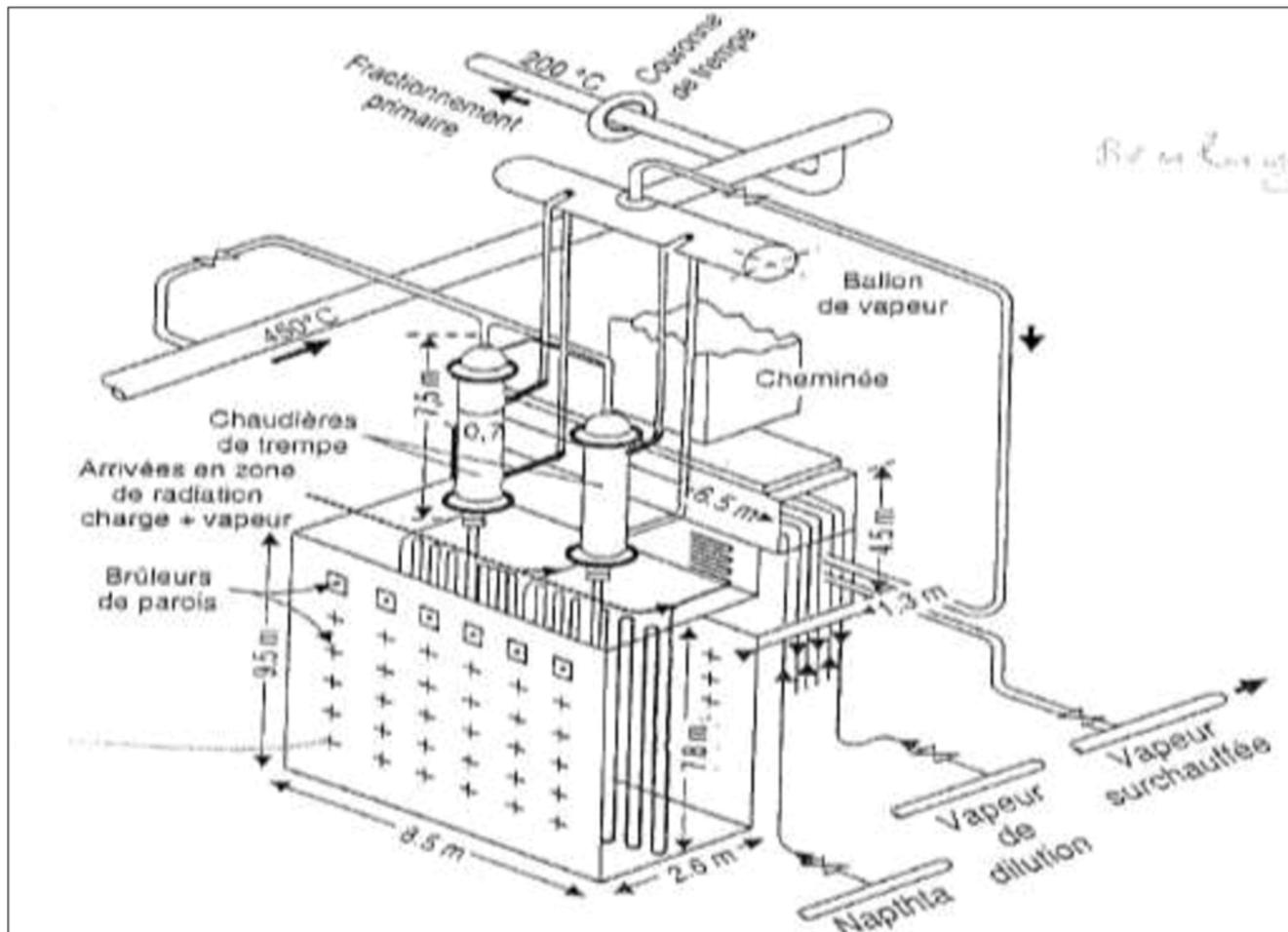
Dans le cas de fours de faible longueur, les brûleurs peuvent être disposés sur les pignons.

### III.4.1.2.b Fours cabines à brûleurs sur les parois

Certains procédés comme le vapocraquage exigent un apport de chaleur intense au faisceau tubulaire et à un niveau de température élevé. Pour atteindre cet objectif il est nécessaire de répartir l'apport de chaleur sur toute la hauteur du four ce qui conduit à disposer des brûleurs sur toute la surface de la paroi.

Le faisceau tubulaire est alors situé dans le plan médian du four.

La zone de convection est utilisée pour préchauffer la charge et la vapeur de dilution et éventuellement pour surchauffer la vapeur produite dans les chaudières de trempe.



**Figure III.8 :** Fours cabines à brûleurs sur les parois

### III.4.2 Selon la fonction

Selon l'effet de l'apport de chaleur au fluide de procédé, on peut distinguer :

#### III.4.2.1 Les fours de réchauffage de fluide sans changement de phase

Dans lesquels la charge liquide ou vapeur ne reçoit que de la chaleur sensible. C'est le cas par exemple :

- des fours des unités de reformage catalytique (charge à l'état vapeur).
- des fours à huile chaude où un liquide caloporteur reçoit l'énergie thermique qu'il cède ensuite dans des réchauffeurs ...

#### III.4.2.2 Les fours de réchauffage de liquide avec vaporisation partielle

Que l'on rencontre en particulier dans les unités de distillation. Dans ces fours, la charge reçoit de la chaleur latente pour atteindre le degré de vaporisation requis.

- fours de distillation atmosphérique ou sous-vide de pétrole brut,
- fours de rebouillage.

### III.4.2.3 Les fours de réchauffage de fluide avec une réaction chimique dans les tubes

Le faisceau tubulaire du four peut alors être assimilé à un véritable réacteur chimique. On rencontre ce type de four dans les unités de craquage thermique :

- craquage thermique de distillats
- viscoréduction de résidus
- vapocraquage (fabrication d'éthylène)
- reformage à la vapeur (fabrication d'hydrogène). Dans ce dernier cas un catalyseur est déposé à l'intérieur des tubes du faisceau.

### III.5 Principaux critères de choix d'un four

Le choix d'un type de four dépend principalement des facteurs suivants :

- Nature du produit chauffé et conditions de service (débit, température, pression, pertes de charges admissibles, taux de vaporisation)
- Type d'écoulement lié au fluide
- Drainabilité des faisceaux tubulaires
- Présence ou non de catalyseur dans les tubes
- Combustible disponible
- Encombrement sur le site
- Technologie particulière à certains procédés
- Facilité de construction ou de transport
- Coût pour une application donnée ...

### III.6 Calcul thermique des fours

Chaque type de four a évidemment son processus de calcul propre, qui tient compte de sa technologie et de ses utilisations. On ne donnera donc ici que les principes de calcul communs à tous les fours.

#### III.6.1 Bilans énergétiques

Quel que soit le four, l'objectif est de fournir aux produits une quantité de chaleur déterminée par :

- sa température initiale ou température d'enfournement ;

- la température finale désirée ou température de défournement ;
- la masse des produits à chauffer ;
- la chaleur massique des produits et, s'il a lieu, les chaleurs de transformation durant la montée en température.

### III.6.1.1 Rendement énergétique des fours

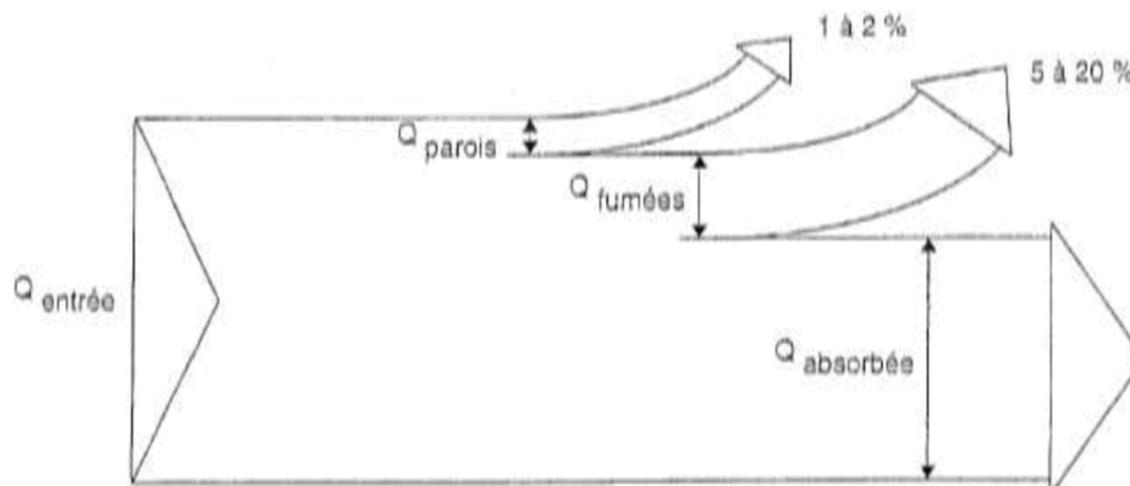
La notion de rendement d'un four apparaît par le fait que le débit de chaleur libérée aux brûleurs par la combustion n'est pas intégralement transmis au fluide procédé. On constate en effet des pertes thermiques qui ont essentiellement deux origines :

- les pertes par les parois du four (**Q parois**) 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 (**Q entrée**). Elles peuvent être beaucoup plus importantes dans le cas de fours anciens dont le réfractaire est défectueux.
- les pertes par les fumées (**Q fumées**) qui évacuent à l'atmosphère un débit de chaleur relativement important représentant en général entre 5 et 20 % de celui qui est libéré aux brûleurs.

Le bilan thermique du four s'exprime :

$$Q_{\text{entrée}} = Q_{\text{absorbée}} + Q_{\text{fumées}} + Q_{\text{parois}} \quad \text{III.1)}$$

Le diagramme ci-dessous donne une représentation graphique du bilan thermique



**Figure III.9** : Schéma du bilan thermique d'un four

Le rendement d'un four (noté par  $\eta$ ) est défini comme le rapport du débit de chaleur absorbé par le fluide procédé au débit de chaleur fourni au four par la combustion ( $Q$  entrée).

$$\eta (\%) = \frac{Q_{\text{absorbée}}}{Q_{\text{entrée}}} \times 100 \quad (\text{III.2})$$

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

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

L'expression du rendement devient :

$$\eta (\%) = \frac{Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{fumées}} - Q_{\text{parois}}}{Q_{\text{entrée}}} \times 100 \quad (\text{III.3})$$

Soit encore :

$$\eta (\%) = 100 \% - \% \text{ pertes fumées} - \% \text{ pertes parois} \quad (\text{III.4})$$

#### III.6.1.2 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** qui accroît le débit de fumées et diminue le rendement du four. En effet, le débit d'air excédentaire consomme de l'énergie libérée aux brûleurs pour s'échauffer de la température ambiante à celle de rejet des fumées.

La combustion en excès d'air se traduit par la présence d'oxygène dans les fumées en teneur d'autant plus élevée que l'excès d'air est grand. Ainsi, le pourcentage de pertes aux fumées dû à l'excès d'air peut être estimé par la relation approchée :

$$\text{Pourcentage de pertes aux fumées dû à l'excès d'air} = \frac{\text{Teneur en oxygène des fumées (\%)}}{2}$$

- **La température de rejet des fumées** qui est d'autant plus élevée que la récupération d'énergie est moins bonne et donc le rendement du four plus faible.

Le pourcentage de pertes aux fumées dû à leur température de rejet s'obtient approximativement par :

$$\text{Pourcentage de pertes aux fumées dû à leur température de rejet} = \frac{T_{\text{des fumées}} (\text{°C})}{20}$$

### III.6.2 Rendement de combustion

Si l'on considère un combustible quelconque, il est caractérisé, entre autres, par :

- son pouvoir calorifique inférieur PCI ;
- le volume d'air nécessaire à sa combustion en stœchiométrie  $V_{a0}$ ;
- le volume de fumées produit par sa combustion en stœchiométrie  $V_{f0}$ .

Dans les conditions usuelles d'utilisation dans les fours, la combustion se fait généralement avec de l'air en excès (et plus rarement avec défaut de l'air).

Si on appelle  $E_a$  l'excès d'air exprimé en pourcentage, les volumes d'air utilisé et de fumées produites lors de la combustion complète d'une unité de masse (pour les solides et les liquides) ou de volume (pour les gaz) de combustible s'écrivent :

$$V_a = V_{a0}(1 + E_a/100) \quad (\text{III. 5})$$

$$V_f = V_{f0} + (V_{a0} \times E_a/100) \quad (\text{III. 6})$$

Les pertes par les fumées s'écrivent :

$$Q_f = V_f C_{pf} T_f \quad (\text{III. 7})$$

Avec :

$T_f$  : température de sortie de fumées du four (en °C),

$C_{pf}$  : capacité thermique volumique moyenne à pression constante dans l'intervalle de température 0°C à  $T_f$

La chaleur apportée par l'air s'écrit :

$$Q_a = V_a C_{pa} T_a \quad (\text{III. 8})$$

Avec :

$T_a$  : température de l'air à son entrée dans le four (en °C),

$C_{pa}$  : capacité thermique volumique à pression constante de l'air.

On appelle rendement de combustion, le rapport :

$$\eta_c = \frac{\text{PCI} + Q_a - Q_f}{\text{PCI}} \quad (\text{III. 9})$$

Le rendement de combustion ne dépend que du combustible, des conditions d'excès d'air dans lequel il est brûlé et de la température des fluides entrant et sortant du four. Il ne dépend pas du type de four, ni de sa technologie.

Si on considère le four et l'équipement éventuel de préchauffage de l'air à partir des fumées comme un seul système, et en considérant, dans ce cas, la température des fumées  $T_f$  à l'aval du réchauffeur d'air, la relation (III.9) devient :

$$\eta_c = \frac{\text{PCI} - Q_f}{\text{PCI}} \quad \text{III. 10)}$$

### III.6.3 Relation entre le rendement énergétique et le rendement de combustion

Ramené à une unité de combustible, la relation (III.3) peut s'écrire :

$$\eta = \frac{\text{PCI} - Q_{\text{pertes}}}{\text{PCI}} \quad \text{III. 11)}$$

$$\eta = \frac{\text{PCI} - Q_{\text{fumées}} - Q_{\text{parois}}}{\text{PCI}} \quad \text{III. 12)}$$

Et en introduisant  $\eta_c$  donné par la relation (III.10) :

$$\eta = \eta_c - \frac{Q_{\text{parois}}}{\text{PCI}} \quad \text{(III. 13)}$$

Dans un certain nombre d'installations, par exemple pour **les fours continus à basse température**, le terme :  $\frac{Q_{\text{parois}}}{\text{PCI}}$  est petit et, dans ce cas, il vient :  $\eta \approx \eta_c$

### III.6.4 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) :

$$Q_r = \int a \sigma S (T_f^4 - T_c^4) dt \quad \text{III. 14)}$$

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

$$Q_c = \int k S (T_f - T_c) dt \quad (\text{III. 15})$$

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

$$\partial T / \partial t = \lambda / c_p \rho (\nabla T) \text{III. 16)}$$

### III.6.5 Possibilités et limites à l'amélioration du rendement d'un four

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

- pertes aux parois
- pertes aux fumées

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

#### III.6.5.1 Réduction des pertes aux parois

Ces pertes peuvent être réduites par l'accroissement de l'isolation thermique. Cependant, leur niveau actuel étant faible (1 à 3 %) l'intérêt économique de cette solution est relativement limité.

L'utilisation de panneaux isolants installés derrière les réfractaires permet d'améliorer l'étanchéité thermique.

#### III.6.5.2 Réduction des pertes aux fumées

*Réduction de l'excès d'air*

Cette réduction permet l'économie de combustible utilisé pour réchauffer l'air en excès de la température ambiante à la température des fumées.

Elle rencontre cependant comme limite l'apparition d'imbrûlés dans les fumées auxquels correspondent :

- une perte de chaleur de combustion (donc un nouveau type de dégradation du rendement)
- un encrassement de la zone de convection réduisant son efficacité

- un risque de post-combustion des imbrûlés présentant un danger pour le personnel et le matériel

Les équipements de contrôles permettant d'apprécier l'apparition d'imbrûlés aux fumées sont (planches pages suivantes) :

- l'opacimètre, dans le cas de combustibles liquides
- l'analyseur de CO dans le cas de combustible gazeux

La réduction de l'excès d'air peut toutefois être obtenue :

- en utilisant des brûleurs soignés réalisant un bon mélange de l'air et du combustible, en particulier, par la turbulence de l'écoulement imposé à l'air, celui-ci étant nécessairement admis sous pression
- en utilisant de l'air chaud préchauffé qui favorise la combustion.

Enfin, si la température de rejet des fumées est basse, la recherche de la combustion à bas excès d'air présente un intérêt limité.

### III.7 Construction des fours

#### III.7.1 Garnissage des parois du four (Enveloppe)

L'enveloppe des fours (chambre de combustion, zone de convection, cheminée) est constituée d'une paroi métallique revêtue intérieurement d'un garnissage isolant et réfractaire.

##### III.7.1.a Charpente et Casing

La charpente, véritable ossature du four, est réalisée en profils sur lesquels des tôles de 5 à 6 mm d'épaisseur sont fixées par boulonnerie ou soudage pour constituer la paroi du four (casing). Elle supporte le faisceau tubulaire indépendamment des isolements réfractaires et permet une libre dilatation des différentes parties du four.

La charpente supporte les efforts dus au poids des éléments constitutifs (faisceaux, réfractaires, carnaux ou cheminée, passerelles,...) et ceux liés aux effets du vent.

Formes du casing :

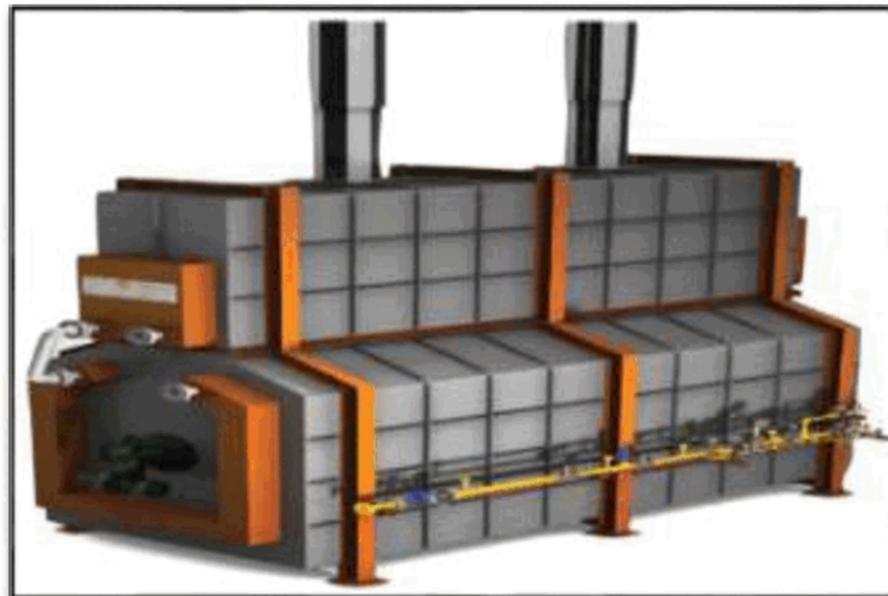
- Cylindre vertical
- Boîte (four classique, four cabine)

À titre d'exemple, pour un four de Reforming catalytique de puissance thermique élevée (200 000 th/h) la répartition des poids des principaux éléments constitutifs se répartit ainsi :

- charpente et tôlerie : 500 tonnes

- réfractaires isolants : 550 tonnes
- faisceau tubulaire : 750 tonnes (dont 150 de picots ou studs).

La chambre de combustion étant généralement en dépression, le casing d'un four doit être suffisamment étanche pour éviter les entrées d'air parasites.



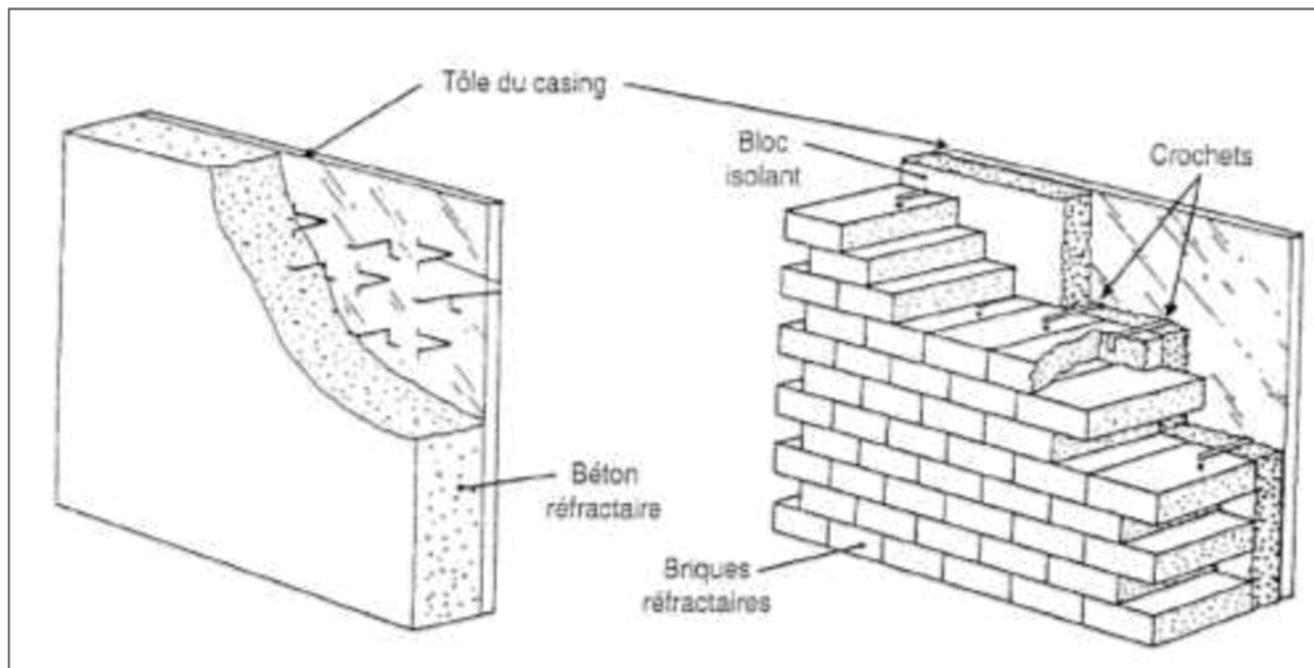
**Figure III.10** : Charpente et casing

### III.7.1.b Isolation thermique

L'enveloppe métallique du four est protégée de la chaleur par un revêtement interne isolant constitué de briques ou béton réfractaires ou encore de fibres céramiques.

- ❖ Rôle :
  - Limiter l'échauffement du casing
  - Limiter les pertes thermiques (baisse du rendement)
- ❖ Les propriétés requises pour un garnissage isolant réfractaire sont variées :
  - Conductivité thermique faible ;
  - Température pyroscopique élevé ;
  - Résistance mécanique élevée ;
  - Bonne résistance aux variations de température;
  - Facilité de mise en œuvre.

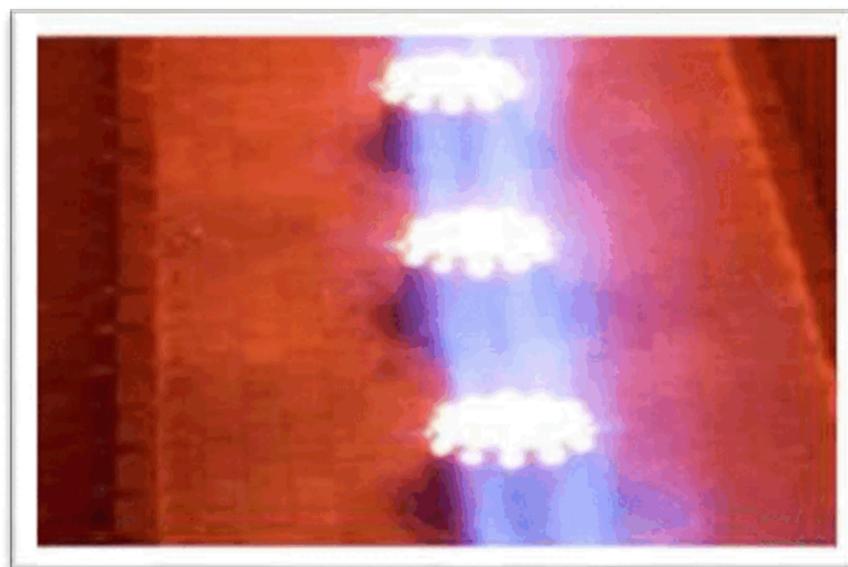
Les schémas ci-dessous (figure III.11) montrent des exemples d'ancrage au casing de béton et briques réfractaires.



**Figure III.11 :** Isolation thermique d'un four (Casing de béton et briques réfractaires)

### III.7.1.b.1 Briques réfractaires

Les briques réfractaires doivent leurs propriétés isolantes à la porosité obtenue par addition de sciure de bois ou d'un produit chimique provoquant un dégagement gazeux lors de la cuisson. Classiquement, les briques sont ancrées sur le casing par des crochets métalliques soudés sur la paroi. Pour éviter des charges excessives sur les briques inférieures, des fers plats soudés au casing ou des rondins passant au travers de trous prévus dans les briques renvoient sur le casing les efforts verticaux.



**Figure III.12 :** Les briques réfractaires

### III.7.1.b.2 Bétons réfractaires

Les bétons isolants sont constitués d'un liant hydraulique comme le ciment fondu mélangé à des agrégats isolants tels que la vermiculite ou des granulés de diatomée. Ils sont coulés ou projetés sur les surfaces à protéger et maintenus en place par des goujons en forme de V ou de Y soudés sur le casing (figure III.11). Plus la température de service des bétons est élevée, plus ceux-ci doivent être denses aux dépens de leurs propriétés isolantes. Cela peut conduire à la mise en place de double-couches de bétons : béton de haute densité pour la face exposée à la flamme, et béton moins dense et plus isolant en sous-couche.

Les épaisseurs usuelles sont de 5 pouces (environ 13 cm) pour l'isolement des zones de convection et de 6 à 8 pouces (15 à 20 cm) pour les zones de radiation.



**Figure III.13 :** Bétons réfractaires

### III.7.1.b.3 Fibres céramiques

Les revêtements isolants en fibres céramiques se présentent sous la forme de nappes que l'on empale sur des goujons soudés au casing et fixées par des rondelles de blocage. Elles offrent les avantages d'une grande légèreté et d'une faible conductibilité thermique mais n'ont pas l'étanchéité des réfractaires classiques. Cela conduit à éviter leur emploi dans le cas de combustibles soufrés.



**Figure III.14 :** Fibres céramiques

❖ *Matériaux utilisables en deuxième couche :*

L'amélioration de l'isolation peut être obtenue en disposant entre les briques et le casing une épaisseur de laine de verre ou fibres minérale.



**(a)** Laine de verre



**(b)** Fibres minérales

**Figure III.15 :** Isolants utilisés en deuxième couche

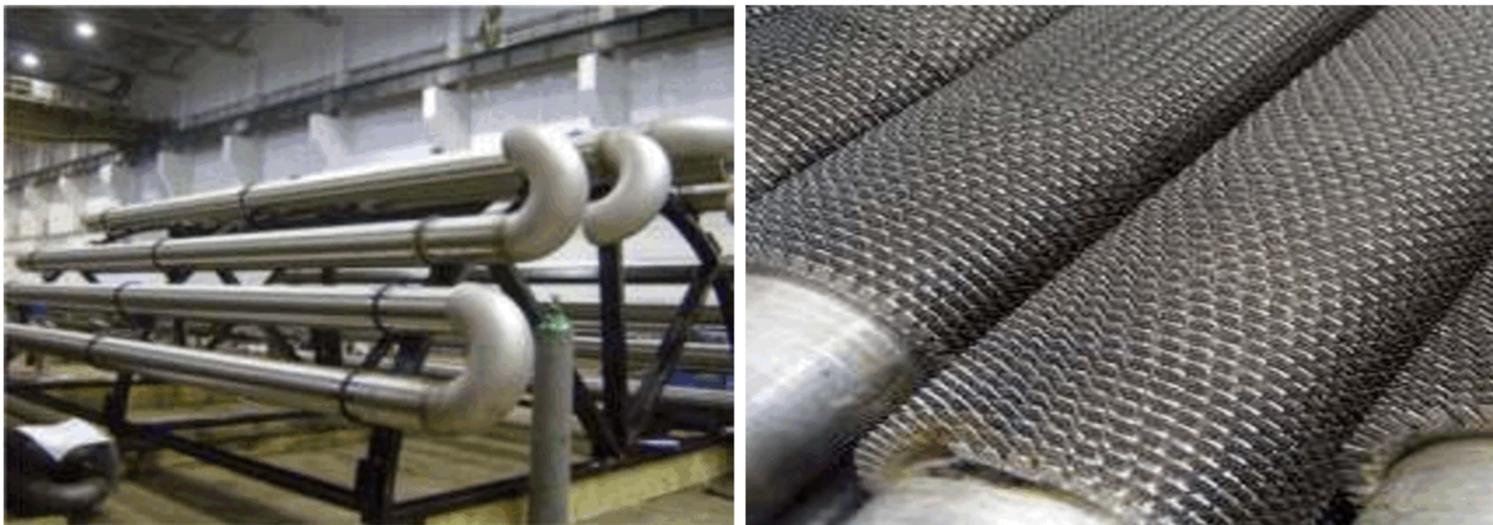
### III.7.2 Zones d'échange

#### III.7.2.1 Faisceau tubulaire

Permettent de transférer l'énergie thermique vers le fluide à réchauffer

- Chambre de combustion : Énergie transférée de la flamme vers les tubes par rayonnement.
- Zone de convection : Énergie transférée des fumées vers les tubes par convection.

- Les tubes de réchauffeurs directs sont principalement réalisés en acier carbone, en acier inoxydable ou en alliages, selon les niveaux de température atteints et les produits véhiculés (résistance à la corrosion). L'acier carbone, par exemple, ne permet pas d'atteindre des températures de peau de tube supérieures à 400 à 500°C.  
Lorsque le niveau de température est très important, les tubes de la zone de rayonnement sont réalisés dans des aciers spéciaux permettant de diminuer le risque de fluage. Ils sont généralement coulés par centrifugation de manière à résister mieux aux contraintes mécaniques et thermiques.
- Les tubes de la zone de convection sont exposés à des températures inférieures et peuvent être construits dans des matériaux plus courants. Selon les besoins, leur surface d'échange peut être augmentée à l'aide d'ailettes et autres dispositifs, afin d'optimiser le transfert thermique.
- ❖ Composition des tubes radiants fonction de la température de fonctionnement :
  - Acier carbone standard (maxi : 400 à 500°C)
  - Acier inox
  - Alliages spéciaux
  - Métaux spéciaux (titane, ...)



**Figure III.16 : Faisceau tubulaire**

### Chapitre III : Les Fours Industriels

---

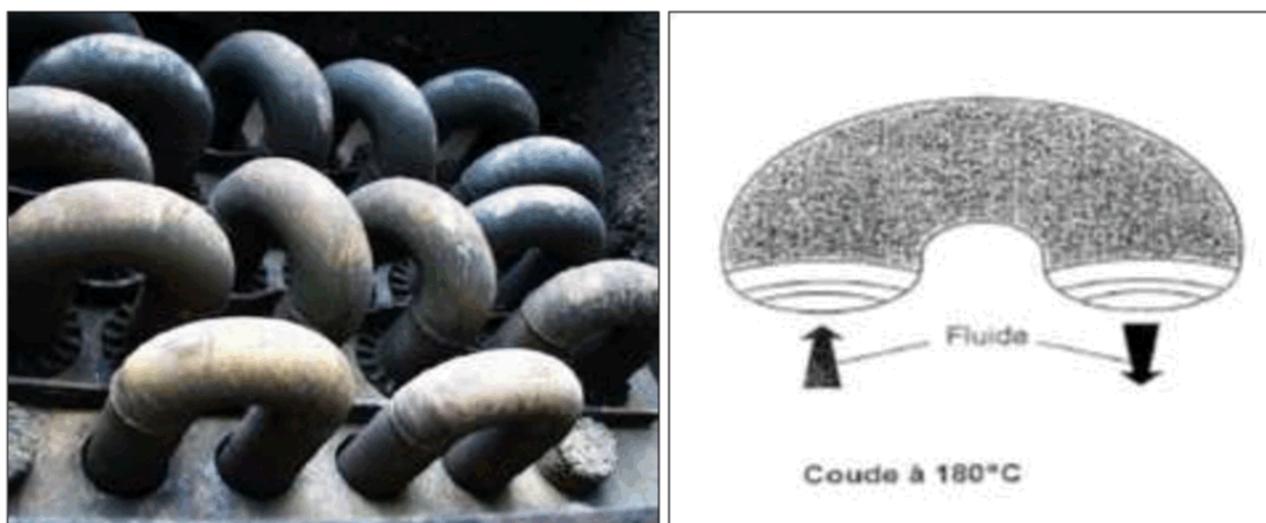
- ❖ Tubes dans la zone de convection généralement réalisés en acier carbone standard ou en inox, augmentation de la surface d'échange par des ailettes.



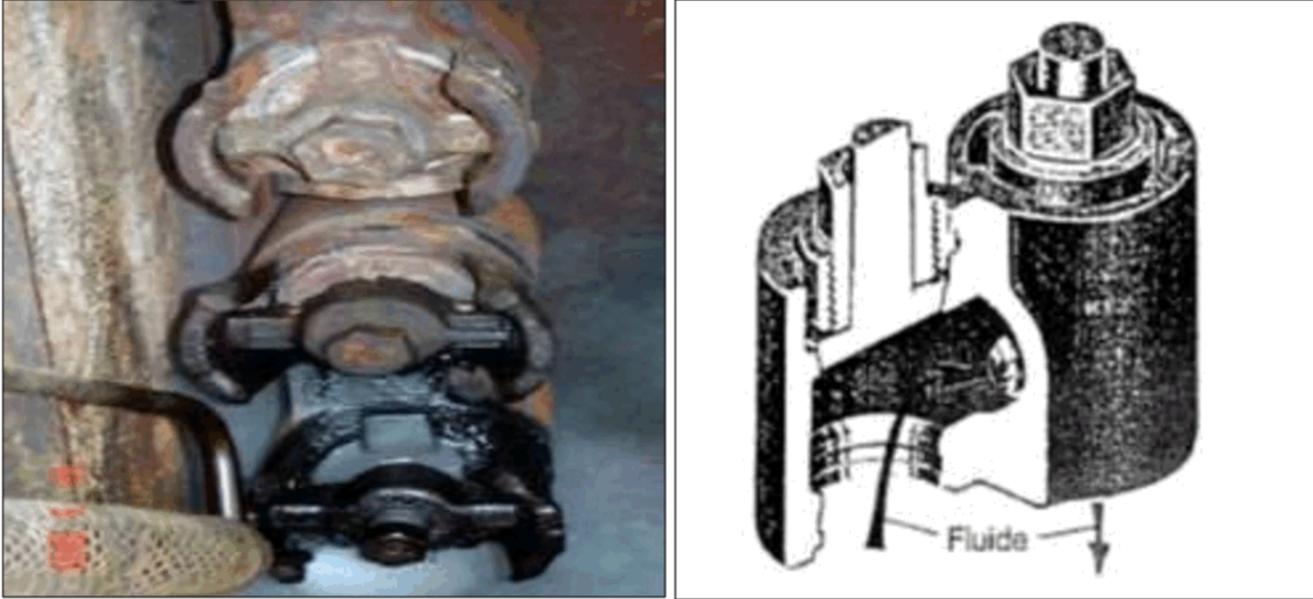
**Figure III.17 :** Tubes avec des ailettes

Les extrémités des tubes doivent être reliées pour permettre un écoulement continu le long des tubes.

Le faisceau est constitué de tubes en acier parallèles reliés entre eux soit par des coudes à 180° soudés (figure III.18), soit par des boîtes de retour soudées ou mandrinées aux tubes (figure III.19). Ces dispositifs permettent l'observation et le nettoyage de l'intérieur des tubes.



**Figure III.18 :** Coudes à 180°



**Figure III.19 :** Boite de retour

### III.7.2.2 Supportage des tubes

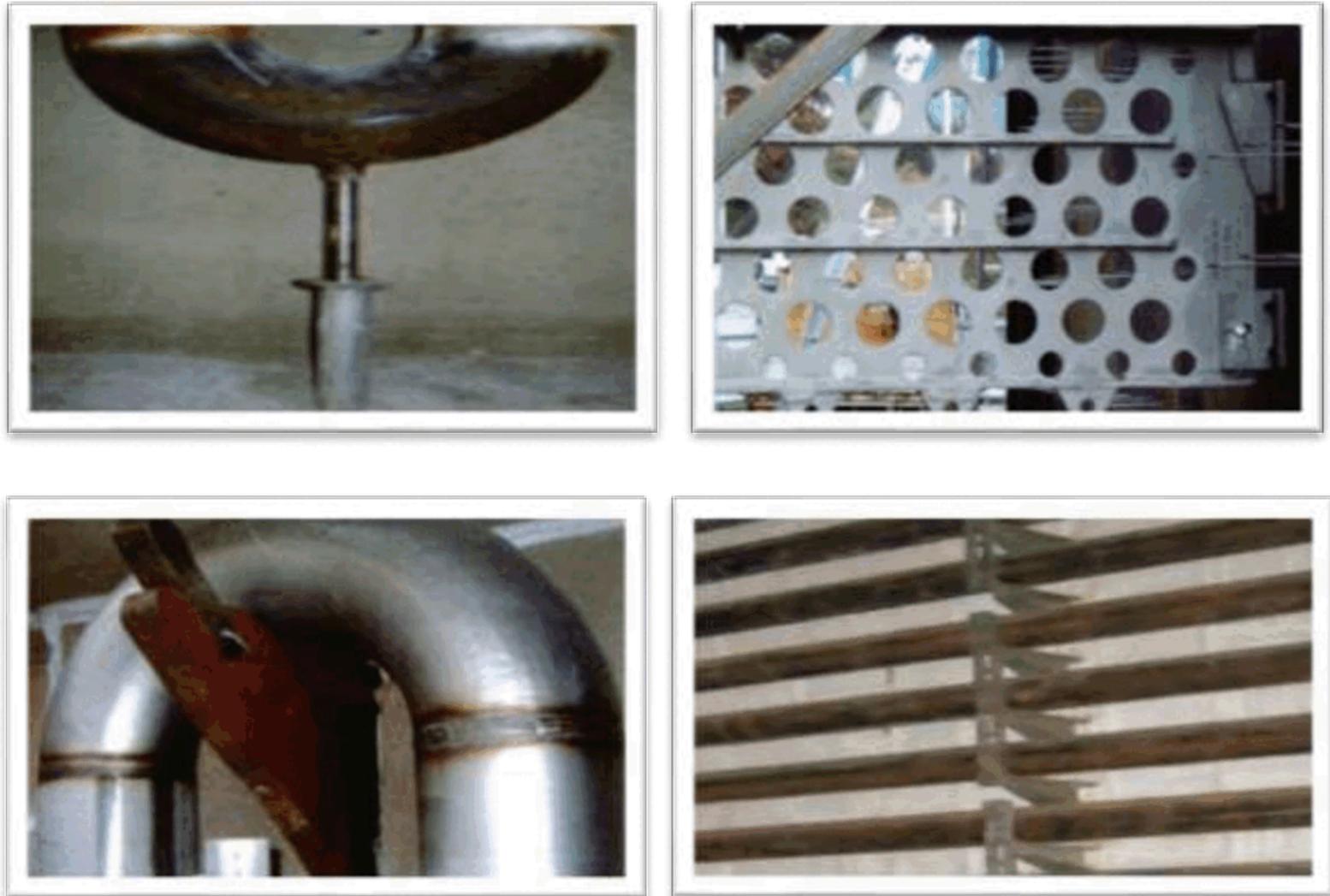
Dans un four tubulaire, les tubes dans la chambre de combustion subissent ce type de déformation qui tend à les allonger. Le fluage est d'autant plus rapide que la température et/ou que la contrainte sont élevées.

Les tubes doivent être supportés et sont guidés par des dispositifs adaptés.

Il faut également vérifier que les tubes du four sont libres de se dilater. Le blocage mécanique de la dilatation génère alors une contrainte supplémentaire dans le tube et peut entraîner sa rupture précoce.

C'est pour cela qu'il est important de vérifier le bon drainage des tubes :

- Température et/ou couleur homogène dans le four.
- Débit de circulation identique aux tubes voisins.



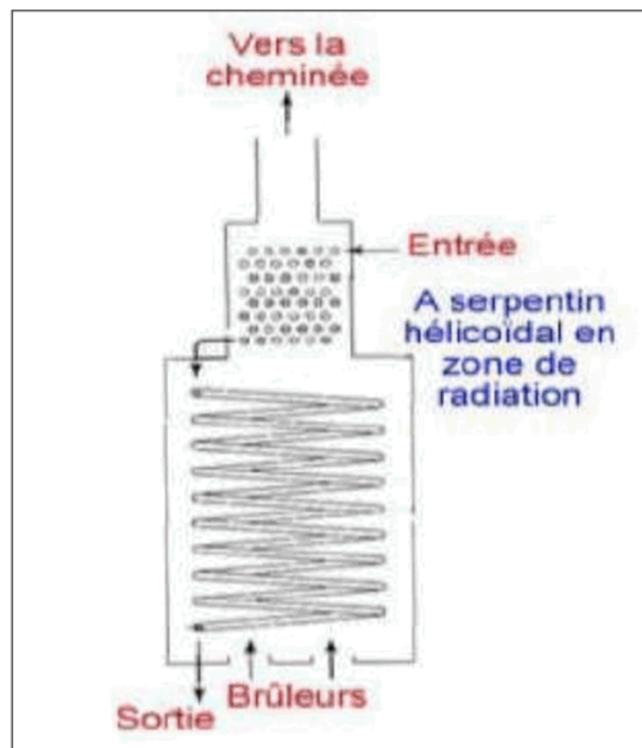
**Figure III.20 :** Supportage des tubes

### III.7.2.3 Disposition des tubes à l'intérieur du four

Dans un four tubulaire, les tubes peuvent être disposés :

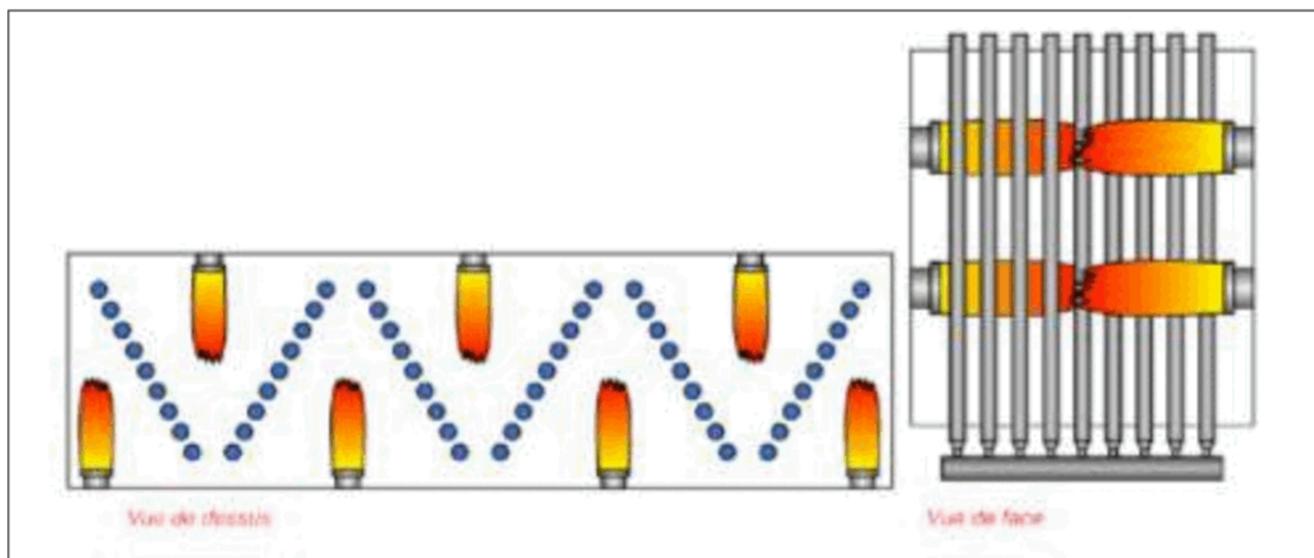
- Verticalement
- Horizontalement
- En enroulement hélicoïdal autour de la flamme.

Les fours tubulaires verticaux sont généralement équipés de tubes verticaux ou de serpentins hélicoïdaux, tandis que les fours classiques et les fours type cabine sont construits avec des tubes horizontaux ou verticaux.



**Figure III.21 :** Four vertical à serpentin hélicoïdal

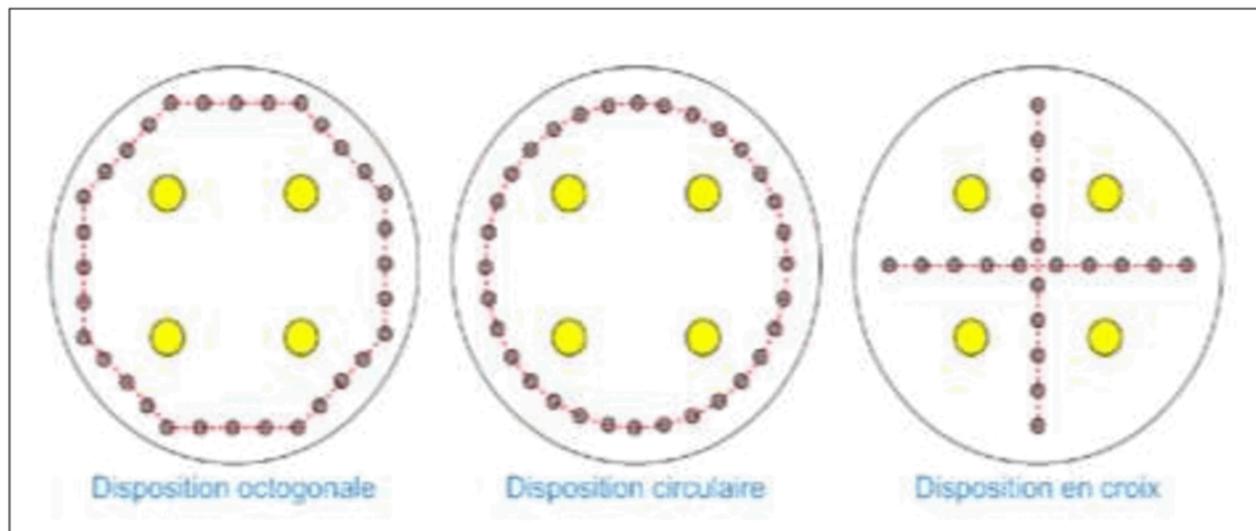
Dans un four type cabine à tubes verticaux, les tubes peuvent être disposés en nappes, comme par exemple sur le four de la figure III.22.



**Figure III.22 :** Four de type cabine à tubes verticaux disposés en nappe

Dans les fours cylindriques, on peut également observer plusieurs dispositions, généralement l'une des 3 suivantes :

- Tubes disposés en cercle autour du ou des brûleurs ;
- Tubes disposés en octogone autour du ou des brûleurs ;
- Tubes disposés en croix entre les différents brûleurs.



**Figure III.23** : Dispositions typiques des tubes dans un four cylindrique

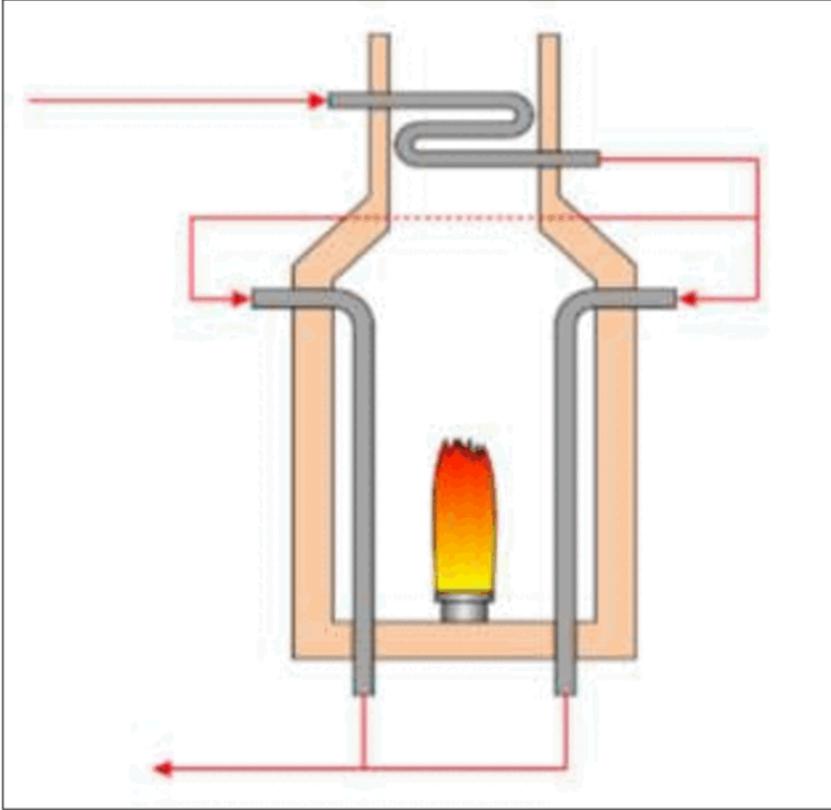
### III.7.2.4 Circulation du fluide process

La circulation du fluide process dans le four peut être soit mono-passe, soit multi-passe.

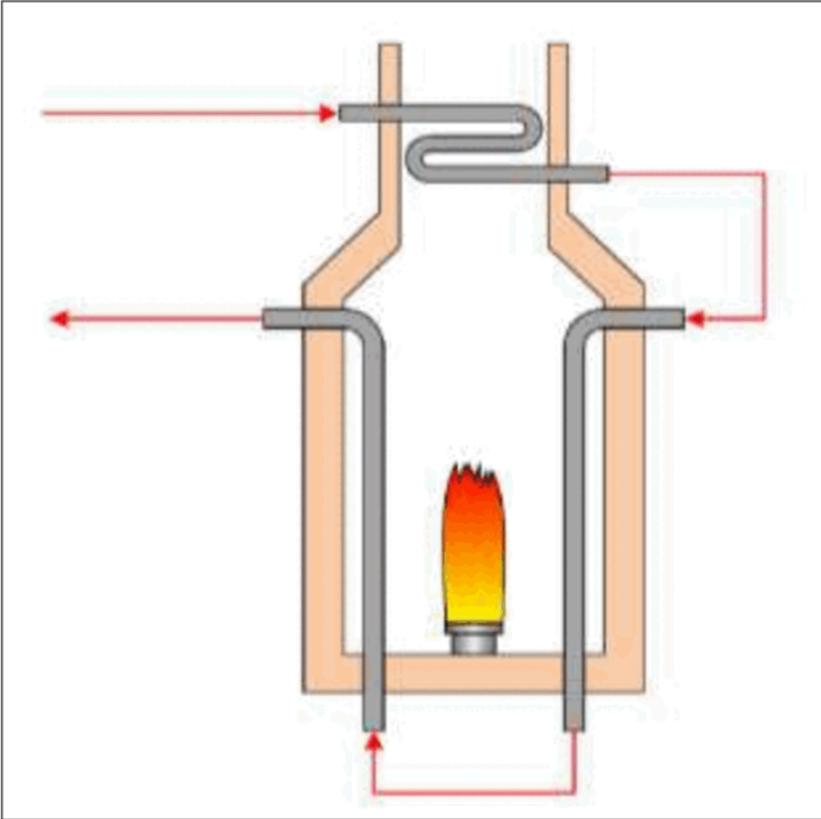
*La circulation mono-passe* consiste à faire circuler le produit dans tous les tubes, les uns à la suite des autres. Ce type de conception permet une régulation relativement simple, mais reste généralement limité à des transferts thermiques de puissance moyenne, car le refroidissement des tubes **diminue** avec l'échauffement du fluide process.

*La circulation multi-passe* consiste à faire diviser le flux process et à le faire circuler dans des circuits en parallèle. La régulation de ce mode de circulation est plus compliquée, mais, comme le flux est réparti équitablement dans le four, chaque tube est théoriquement drainé de la même manière, et donc est refroidi de la même manière. Au fur et à mesure que la charge d'alimentation chauffée quitte le four, elle est regroupée en sortie.

Généralement, le préchauffage du fluide dans la zone de convection est réalisé en circulation mono-passe (niveau thermique plus faible), tandis que le chauffage dans la zone de rayonnement est réalisé en multi-passe.



**Figure III.24 :** Circulation mono-passe en zone de convection et multi-passe en zone de rayonnement



**Figure III.25 :** Circulation mono-passe en zones de convection et de rayonnement

### III.7.3 Bruleurs

#### III.7.3.1 Définition

Un bruleur est l'élément mécanique qui assure la production de chaleur en assurant le mélange d'un combustible avec de l'air (comburant) produisant ainsi une combustion. Le mélange nécessite le meilleur réglage pour que le rendement de combustion soit maximum et que la combustion soit la plus complète possible.

#### III.7.3.2 Rôle d'un bruleur

Le rôle du bruleur est en général double :

- Assurer le mélange carburant-comburant dans les proportions choisies (par exemple, selon un rapport air-gaz ou avec un léger excès d'air)
- Réaliser la combustion de ce mélange dans les conditions optimales (allumage et maintien de la flamme, combustion complète).

Il a donc un rôle déterminant dans la qualité de la combustion, et par suite dans l'émission de polluants ou d'imbrûlés en plus ou moins grande quantité dans les fumées.



Figure III.26 : Bruleurs

### III.8 Applications des fours

#### III.8.1 Applications des fours directs

L'industrie pétrolière et gazière utilise des réchauffeurs directs pour chauffer les liquides.

Les réchauffeurs directs existent sous différentes formes pour un large éventail de fonctions :

- Unités de cokéfaction
- Réchauffeurs sous vide
- Réchauffeurs de brut
- Rebouilleurs
- Viscoréducteurs
- Colonnes de fractionnement
- Réchauffeurs de pétrole chaud
- Réchauffeurs d'isomérisation.

#### III.8.2 Applications des fours indirects

Le côté foyer fonctionne généralement à pression atmosphérique, mais le serpentin tubulaire peut fonctionner à des pressions dépassant 100 bars, ce qui permet les utilisations suivantes :

- Réchauffement du gaz de tête de puits avant son entrée dans la conduite de transmission
- Chauffage périodique du gaz pendant qu'il progresse dans la canalisation, afin d'éviter la formation d'hydrates
- Chauffage du gaz de tête de puits afin d'éviter la formation d'hydrates après son retour via la soupape d'étranglement
- Chauffage du pétrole brut
- Vaporisation de propane ou de GPL
- Rebouillage du stabilisateur, du régénérateur et de la colonne de distillation.

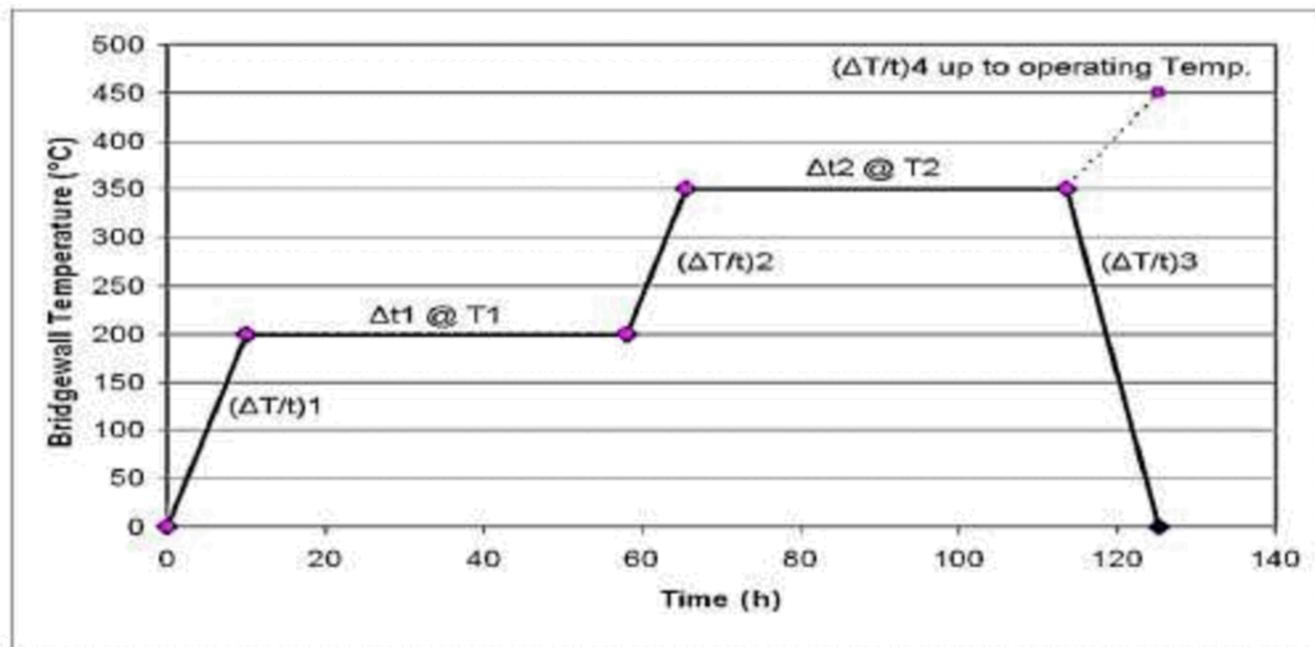
### III.9 Exploitation des fours industriels

#### III.9.1 Démarrage initial d'un four et opération de Séchage

Avant le premier démarrage du four ou après réparation du réfractaire ou encore après un long arrêt, le four doit être chauffé graduellement dans le but d'évacuer toute l'humidité présente dans le réfractaire. Cette humidité doit être enlevée d'une manière contrôlée pour éviter de fissurer et d'endommager le réfractaire pendant l'exploitation du four.

### Chapitre III : Les Fours Industriels

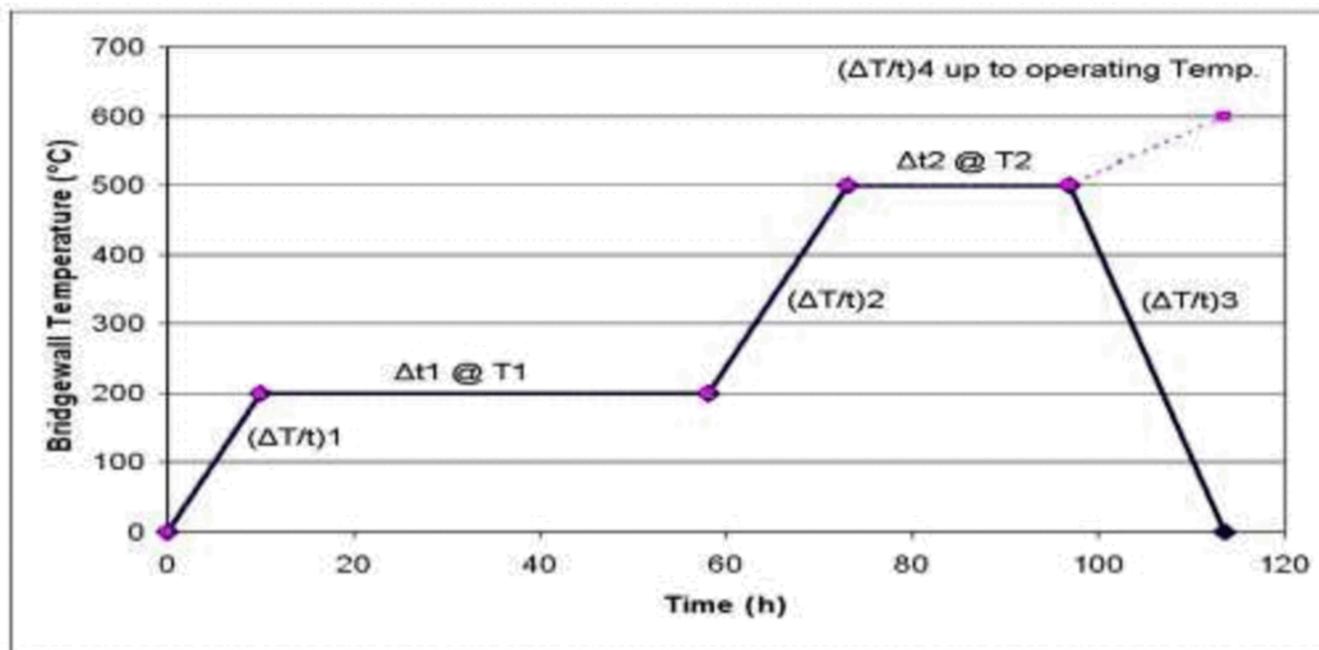
Cette opération doit être conduite de préférence le plutôt possible après la construction. Néanmoins, un délai minimum de 48 heures doit être respecté; nécessaire pour la prise des différents liants. Dans le cas où cette opération doit être différée, les ouvertures du four doivent être protégée par du matériel imperméable à l'effet d'empêcher toute pénétration d'eau et son contact avec le réfractaire.



STANDARD VALUES:

$\Delta t_1 = 48 \text{ h}$	$T_1 = 200^\circ\text{C}$	$(\Delta T/t)_1 = 20^\circ\text{C/h}$	$(\Delta T/t)_3 = 30^\circ\text{C/h}$
$\Delta t_2 = 48 \text{ h}$	$T_2 = 350^\circ\text{C}$	$(\Delta T/t)_2 = 20^\circ\text{C/h}$	$(\Delta T/t)_4 = 30^\circ\text{C/h}$

Figure III.27 : Profil de température de séchage d'un four sans circulation de fluide



STANDARD VALUES:

$\Delta t_1 = 48 \text{ h}$	$T_1 = 200^\circ\text{C}$	$(\Delta T/t)_1 = 20^\circ\text{C/h}$	$(\Delta T/t)_3 = 30^\circ\text{C/h}$
$\Delta t_2 = 24 \text{ h}$	$T_2 = 500^\circ\text{C}$	$(\Delta T/t)_2 = 20^\circ\text{C/h}$	$(\Delta T/t)_4 = 30^\circ\text{C/h}$

Figure III.28 : Profil de température de séchage d'un four avec circulation de fluide

Chaque four est fourni avec son propre diagramme de séchage ou de mise en service. Le diagramme proposé dans ce cours est basé sur le gradient minimum de chauffage requis. Les vitesses de chauffage peuvent être diminuées mais pas augmentées. Par contre la durée des paliers peut être prolongée les conditions l'exigent.

### III.9.2 Mise en service et contrôle de fonctionnement d'un four

Le BMS (**Burners Management System**, est un système de sécurité utilisé pour assurer le démarrage, le fonctionnement et l'arrêt en toute sécurité des Fours), va veiller à l'application correcte de la procédure de démarrage et au fonctionnement sécurisé des allumeurs et brûleurs. Le BMS communique avec l'opérateur via le tableau local pour les différentes commandes. Les différentes étapes (Séquences) de démarrage du four sont :

- **Préparation du four pour l'allumage**
  - Objectif : garantir l'absence de combustible dans le four (risque d'explosion)
  - Balayage du four par l'air pendant une durée minimale.
- **Allumage des pilotes**
- **Allumage des brûleurs**
- **Montée en température du four**

**Attention :** il est important de mettre en circulation le fluide process avant l'allumage des brûleurs.

Respectez les vitesses de montée en température et les paliers pour éviter le vieillissement prématuré de l'équipement

La préparation du four pour l'allumage consiste premièrement à s'assurer de la propreté et de l'accessibilité de la zone du four : élimination des déchets, rangement des outils, nettoyage des flaques d'huile, ...

Ensuite, l'opérateur doit s'assurer de la bonne disponibilité et du fonctionnement de tous les outils qu'il peut être amené à utiliser pendant le démarrage :

- Lorsque l'allumage du four est réalisé à l'aide d'une lance portative,
- Si l'allumage des brûleurs nécessite l'utilisation de bouteilles de gaz, il faut également vérifier leur niveau de remplissage.

L'opérateur de terrain doit vérifier le bon lignage du four, aussi bien côté combustion que côté procédé et utilités. Après des travaux, il est préférable de s'assurer du bon fonctionnement des sécurités et des boucles de régulation en les testant à vide.

La gestion du démarrage d'un four est généralement confiée à un automate qui valide les différentes étapes et met automatiquement le four en sécurité en cas de défaut sur les sécurités du four.

La première étape du démarrage d'un four est le balayage de la chambre de combustion, dont le but est d'éliminer l'accumulation de gaz inflammable dans le four (combustible gazeux, imbrûlés,...). Ce balayage consiste à faire circuler de l'air dans le four pendant une durée suffisante.

- Sur un four à tirage naturel, il faut ouvrir le registre de la cheminée pour maintenir une bonne dépression dans le four.
- Lorsque le tirage est induit, forcé ou balancé, l'automate du four vérifie généralement que le débit d'air est suffisant pendant toute la durée du balayage.

Éventuellement, il peut être prudent, dans le cas d'un four à tirage naturel, d'inerté la chambre de combustion avec la vapeur d'étouffement avant le balayage ; l'injection de vapeur doit être coupée lorsqu'on la voit sortir par la cheminée.

Une fois le four purgé, l'étape suivante est l'allumage des pilotes :

- Lorsque l'allumage des pilotes est entièrement géré par l'automate, il y a en principe un nombre maximal de tentatives (souvent 3) avant le déclenchement d'un nouveau balayage pour éliminer le combustible accumulé.
- Lorsque l'allumage des pilotes est réalisé par l'opérateur terrain, l'automate surveille une durée maximale en shuntant la détection de flamme pendant cette durée. Lorsque celle-ci est dépassée, la sécurité de détection de flamme est réactivée ; si les pilotes ne sont pas allumés, le four déclenche, ce qui nécessitera un nouveau balayage.

Le four est ensuite mis en chauffe progressive. Sur les gros fours, on n'allume généralement pas tous les brûleurs en même temps, car l'énergie libérée par la combustion serait trop importante.

La montée en température du four doit toujours être progressive et suivre la courbe d'évolution prévue par le constructeur, afin de limiter l'usure du four. En effet, un four est composé de plusieurs types de matériaux différents, qui ne se dilatent pas à la même vitesse : une montée progressive et des paliers de température permettent de limiter l'impact de ces différences.

Après des travaux sur le réfractaire, il faut normalement prévoir des paliers de température plus longs pour s'assurer du bon séchage de celui-ci.

Avant d'allumer les brûleurs, il faut s'assurer de la circulation du fluide process dans les tubes radiants (risque de surchauffe).

### *Exemple pratique de procédure de démarrage d'un four*

#### ❖ **Préparation du four pour le démarrage**

Avant toute opération, l'opérateur doit s'assurer que :

- S'assurer que le four et la zone l'entourant sont propres. Dégager les plates-formes, les échelles et les passerelles.
- Retirer les débris, les outils ou les chiffons imbibés de pétrole présents dans le four ou autour.
- Retirer les matériaux inflammables de la chambre de combustion avant d'allumer les brûleurs.
- Fermer les regards et les trappes de la boîte de retour afin que l'air ne puisse pas entrer.
- Vérifier les soupapes des réseaux de gaz de carneau et de combustible et les soupapes du brûleur afin de voir si elles ont été correctement entretenues et bien réglées.
- Les registres d'air des brûleurs sont ouverts à 50% minimum
- Le four est prêt comme indiqué par un voyant sur le panneau local
- Toutes les vannes manuelles des allumeurs et brûleurs sont fermées
- Le voyant **four prêt** ne s'allumera que si :
  - ✓ Aucune condition de déclenchement n'est présente
  - ✓ Toutes les vannes de sectionnement gaz des pilotes et brûleurs sont fermées
  - ✓ L'évent sur le collecteur gaz des pilotes et l'évent sur le collecteur gaz des brûleurs sont ouverts
  - ✓ ventilateur à l'arrêt et disponible.
  - ✓ La purge est utilisée pour créer un appel d'air et retirer toutes les vapeurs inflammables du four et sa sera réalisé soit par la vapeur ou avec l'air.

### ❖ Purge du four

Avec toutes les conditions précédentes remplies :

- Appuyer sur le bouton « Purge Start »
- Le BMS va commander la mise en service du ventilateur pour une durée de 20 minutes et le voyant « purge en cours » va s'allumer.
- Une fois ce délai écoulé le BMS va commander l'arrêt du ventilateur.
- Si toutes les conditions de purge sont maintenues le voyant « purge terminée » va s'allumer et rendra possible l'exécution de la procédure d'allumage des pilotes.

### ❖ Mise en service des pilotes

- Appuyer sur le bouton poussoir « Open fuel to pilot » pour ouvrir le gaz vers les allumeurs. Ceci fermera l'évent et ouvrira la vanne de sectionnement gaz sur le collecteur gaz pilotes.
- Un voyant indiquera la réussite de l'opération.
- Ouvrir la vanne manuelle gaz du premier pilote et appuyer sur son bouton poussoir de mise en service (ouverture vanne de sectionnement et étincelles pendant 10s).
- Ceci ne sera permis qu'après 10 secondes, temps nécessaire au système pour vérifier que la pression gaz est dans les bonnes limites.
- Si la flamme est détectée dans le temps imparti à l'allumage (10s) un voyant s'allumera sur le panneau local et l'opérateur peut poursuivre l'allumage des autres pilotes. Si non, la vanne de sectionnement se fermera. après trois essais infructueux, une temporisation de 10 mn est programmée.
- La phase d'allumage des pilotes sera considérée comme terminée une fois tous les pilotes mis en service, sauf ceux en hors service ou en maintenance et désignés tels quels, ou 15 minutes après la fin de la purge.
- Si aucune flamme n'est détectée sur les pilotes en service 5 minutes après la fin de la phase de purge la procédure d'allumage sera annulée, l'opération de purge du four doit être reprise.

### ❖ Mise en service des brûleurs

- Quand l'opération d'allumages des pilotes est terminée, les flammes de tous les pilotes disponibles détectées et leurs voyants allumés, la mise en service des brûleurs est autorisée.

- Appuyer sur le bouton poussoir « Open fuel to Burners » pour ouvrir le gaz vers les brûleurs. Ceci fermera l'évent et ouvrira la vanne de sectionnement gaz sur le collecteur gaz des brûleurs.
- Un voyant indiquera la réussite de l'opération.
- Si la pression gaz du collecteur brûleur est dans les limites requises (test de 10 s), appuyer sur le bouton poussoir « Burner start » du premier brûleur. Un voyant indiquera la réussite de l'opération.
- Note: La logique n'autorisera pas l'ouverture de la vanne gaz d'un brûleur dont la flamme de l'allumeur n'est pas détectée.
- Ouvrir la vanne manuelle gaz et vérifier visuellement l'allumage du brûleur.
- Procéder à l'allumage des autres Brûleurs disponibles.

Que ce soit un redémarrage à froid ou à chaud, l'opérateur doit vérifier pendant la montée en température :

- la couleur et la forme de la flamme.
- la flamme ne touche pas les tubes.
- la couleur du réfractaire est uniforme, aucun signe évident de fissure.
- pas de fumée à la cheminée.
- teneur en oxygène des fumées : L'opérateur doit régler le damper cheminée pour optimiser la combustion du four. Augmenter l'ouverture si le pourcentage O<sub>2</sub> est inférieur à 3%, et inversement si le pourcentage O<sub>2</sub> est supérieur à 3%.
- Pendant ces opérations, faire très attention pour ne pas provoquer d'importante fluctuation de la pression de la chambre de combustion qui doit rester entre -4 et -2 mmH<sub>2</sub>O.
- les vibrations, les bruits anormaux et les problèmes mécaniques.
- la température métal des tubes.
- Le débit et la température de la charge sont progressivement réduits sur une période de plusieurs heures. Quand le taux de charge et la température ont été réduits à une fraction de leur valeur normale
- L'unité entière est « hors circuit ». Le fluide process restant dans l'unité est envoyé dans le circuit court de l'unité, tubes du four compris.

- Quand l'alimentation en combustible est réduite, arrêtez certains des brûleurs pour maintenir une pression adéquate au niveau du collecteur de gaz, ce qui évite les retours ou les extinctions de flamme.
- Fermeture des vannes de sectionnement sur le collecteur gaz des allumeurs,
- Fermeture de la vanne de sectionnement de chaque allumeur,
- Ouverture de l'évent sur le collecteur gaz allumeurs,
- Fermeture des vannes de sectionnement sur le collecteur gaz des brûleurs,

### III.9.3 Arrêt d'un four

Il y a deux types d'arrêts :

- Les arrêts programmés ou normaux
- Les arrêts d'urgence.

Dans le cas des arrêts programmés, il est préférable de diminuer progressivement le régime du four, en éteignant les brûleurs les uns après les autres, afin de limiter les chocs thermiques. L'arrêt programmé d'un four peut également être l'occasion de tester le bon fonctionnement d'une de ses sécurités.

Ceci n'est pas possible dans le cas des arrêts d'urgence, où il faut être particulièrement attentif au risque de fuite en cas de choc thermique.

#### III.9.3.1 Etapes de l'arrêt d'un four

1. Fermeture de la vanne de sectionnement de chaque brûleur,
2. Ouverture de l'évent sur le collecteur gaz brûleurs,
3. Le flux d'air refroidissant dans le four est augmenté par l'ouverture des trappes d'air, des trappes d'accès et du registre de la cheminée. Si le four doit être hors service pendant quelques temps, installez des obturateurs dans les conduites de combustible.
4. Allumage du voyant d'arrêt four sur le panneau local.
5. La circulation continue dans la plupart des équipements pendant plusieurs heures pour refroidir l'unité.
6. Si les tubes du four doivent être ouverts, les tubes sont purgés à la vapeur.
7. Si quelqu'un doit entrer dans le four pour l'inspecter ou le réparer, des obturateurs doivent être installés dans les conduites de combustible.

### III.9.3.2 Arrêt normal

L'arrêt d'un four fait généralement partie de la fermeture d'une unité complète à des fins d'inspection et de réparation. Parfois, un four est arrêté à des fins de réparations pendant que le reste de l'unité est en veille. Le débit de la charge et la chaleur du four sont réduits en même temps.

Le débit et la température de la charge sont progressivement réduits sur une période de plusieurs heures. Quand le taux de charge et la température ont été réduits à une fraction de leur valeur normale, tous les brûleurs du four sont arrêtés.

L'unité entière est « hors circuit ». Le pétrole restant dans l'unité est envoyé dans le circuit de pétrole de l'unité, tubes du four compris.

La circulation continue dans la plupart des équipements pendant plusieurs heures pour refroidir l'unité. Quand l'unité est assez froide pour ne vaporiser de pétrole nulle part, la circulation est arrêtée.

Si les tubes du four doivent être ouverts, le pétrole est déversé et les tubes sont purgés à la vapeur. L'arrêt de l'unité est la réduction progressive de l'écoulement de pétrole et de la chaleur, jusqu'à ce que l'unité entière soit assez froide pour être purgée.

Le point de contrôle du contrôleur enregistreur de température (TRC) est réinitialisé manuellement. Le contrôleur enregistreur de température charge le combustible à un taux moindre. Quand la température tombe plus bas que la fourchette du contrôleur enregistreur de température, le fonctionnement manuel devient nécessaire.

Quand l'alimentation en combustible est réduite, arrêtez certains des brûleurs pour maintenir une pression adéquate au niveau du collecteur de gaz, ce qui évite les retours ou les extinctions de flamme. Quand le taux de charge et la température sont assez bas, arrêtez tous les brûleurs en fermant chaque soupape de brûleur individuellement.

La vapeur est utilisée pour purger l'injecteur d'huile, c'est pourquoi elle n'est pas arrêtée quand la soupape de réglage de l'huile est fermée. Pour purger l'injecteur, fermez la vanne d'isolement de l'huile et ouvrez à nouveau la soupape de réglage de l'huile.

Fermez la soupape de réglage de la vapeur et ouvrez la soupape de dérivation de la vapeur pour rincer toute l'huile du brûleur. Ensuite, fermez la soupape de dérivation de la vapeur et la soupape de réglage de l'huile. Enfin, fermez la vanne d'isolement de la vapeur.

Une fois que toutes les soupapes de gaz sont fermées, fermez la soupape du collecteur de gaz. Ensuite, fermez toutes les vannes d'isolement et de dérivation.

Le flux d'air refroidissant dans le four est augmenté par l'ouverture des trappes d'air, des trappes d'accès et du registre de la cheminée. Si le four doit être hors service pendant quelques temps, installez des obturateurs dans les conduites de combustible.

Si quelqu'un doit entrer dans le four pour l'inspecter ou le réparer, des obturateurs doivent être installés dans les conduites de combustible.

### III.9.3.3 Arrêt d'urgence

L'arrêt d'urgence est nécessaire quand le fonctionnement du four devient gravement anormal. Des conditions anormales dans l'unité ou le four peuvent entraîner la nécessité d'un retrait rapide du combustible et de la charge du four.

En cas d'urgence concernant le four, vous devez faire en sorte de vous protéger, vous et les autres travailleurs, afin d'éviter toute blessure. Vous devez agir avec précaution, minimiser le danger et maintenir l'équipement en bon état de fonctionnement. Vous devez également limiter les effets de l'urgence sur l'ensemble des activités de raffinerie.

Pour traiter efficacement une urgence concernant un four, vous devez planifier vos actions à l'avance et être prêt à les effectuer. Vous devez également étudier votre équipement et les instructions d'utilisation de l'unité.

Vous devez connaître la température admissible maximale pour la chambre de combustion, la culotte de bouilleur et la cheminée.

Vous devez être prêt à arrêter la combustion en enlevant un ou plusieurs des trois éléments du triangle du feu.

Vous devez savoir à l'avance que les vannes d'isolement et de purge sont en état de marche et comment les atteindre en cas d'urgence.

Ces commandes d'urgence sont situées dans une zone protégée qui peut être atteinte sans trop de risque.

### III.9.4 Décokage des tubes de four

On entend par cokage l'accumulation de dépôts dans les tubes. Le coke agit en tant qu'isolant et réduit donc le transfert de chaleur au flux de procédé.

Il réduit également le débit d'écoulement, limitant ainsi la chaleur transportée par le courant de procédé.

Moins de chaleur étant transférée et transportée par le flux de procédé, de la chaleur s'accumule dans le métal des tubes. Cette accumulation de chaleur peut être fréquemment interprétée comme un point chaud.

Autre moyen de détecter un cokage : contrôler la température des parois des tubes. Si rien n'est entrepris pour corriger le problème de cokage, les tubes peuvent éventuellement rompre.

Un four peut être décoké en injectant de la vapeur et de l'air surchauffés dans les tubes.

Cette action a pour effet de brûler le coke et de nettoyer les tubes. Avant de décoker les tubes, le flux de procédé doit être coupé.

Dans certains fours, différentes sections du réchauffeur peuvent être décokées sans interruption des écoulements dans d'autres sections.

Dans d'autres fours, tous les écoulements doivent être arrêtés, ce qui implique l'arrêt de l'opération de traitement.

Les opérations de décokage peuvent être réalisées par :

- Décokage mécanique avec de l'eau à très haute pression
- Décokage à la vapeur et à l'air

#### *Phases de refroidissement, d'écaillage :*

Pendant cette phase seule la vapeur est injectée à l'entrée d'une passe à un débit élevé tandis que l'on chauffe.

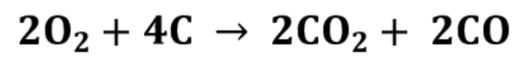
Le tube est bonifié et le coke est détaché de la paroi par l'action refroidissante de la vapeur sur les tubes chauds obligeant le coke à se contracter et à se briser. L'entraînement de la vapeur à grande vitesse et l'action chimique.



Durant cette phase et si l'opération est bien conduite on pourra éliminer de 90% à 95% du coke.

### *Phases de combustion :*

Le reste du coke, considéré comme infime, est brûlé à l'air en présence de la vapeur.



Les opérations de décokage peuvent être réalisées aussi par décokage mécanique par « pigging » au moyen d'eau à basse pression poussant un racleur ou « pig ».



**Figure III.29 :** Décokage mécanique par pigging

# **CHAPITRE IV**

## **LES CHAUDIERES INDUSTRIELLES**

## **Chapitre IV : LES CHAUDIERES INDUSTRIELLES**

### **IV.1 Introduction**

Les productions de vapeurs ou d'eau chaude occupent une place dominante dans les activités industrielles, le principe est de chauffer de l'eau et produire de la vapeur, l'énergie thermique peut être produite de diverses manières soit par l'électricité effet Joules, par combustion solide, liquide ou gazeuse.

Un générateur de vapeur est l'un des composants clés d'une installation thermique. Sa fonction principale est de produire de la vapeur (à basse, moyenne ou haute température). Cette vapeur est utilisée pour des raisons industrielles telle que la production de l'énergie électrique.

### **IV.2 Définition de la chaudière**

Chaudière désigne un appareil (un récipient fermé) permettant de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide caloporteur (le plus généralement de l'eau). L'énergie thermique transférée (source de chaleur) peut être soit la chaleur dégagée par la combustion (de charbon, de fioul, de gaz, de bois, de déchets, etc.), soit la chaleur contenue dans un autre fluide (chaudière de récupération sur gaz de combustion ou gaz de procédés chimiques, chaudière nucléaire recevant la chaleur du circuit primaire, etc.), soit encore d'autres sources de chaleur (chaudières électriques, par exemple). Les chaudières sont aussi bien des systèmes industriels que domestiques.

### **IV.3 Rôle des chaudières industrielles**

Le rôle d'une chaudière est essentiellement de produire de la vapeur d'eau à pression et température élevées dans les meilleures conditions de rendement et de sécurité. Elle transmette 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. Cette vapeur sera utilisée dans les unités industrielles comme :

- fluide moteur des machines tournantes (entraînement des pompes et compresseurs) ;
- fluide de procédé (chauffage, stripping, dégazage) ;

- production interne d'électricité (entraînement des générateurs de courant) ;

De plus, les chaudières à vapeur de grande puissance sont en général associées à une turbine à vapeur pour produire de l'énergie électrique.

Une chaudière industrielle fournit de la vapeur surchauffée à diverses pressions et température :

- Vapeur **HP** (haute pression  $P = 48\text{bar}$  jusqu'à  $180\text{ bar}$ ,  $T = 490^\circ\text{C}$ ) turbomachine, turboalternateur
- Vapeur **MP** (moyenne pression  $P = 12\text{bar} - 35\text{ bar}$ ,  $T = 300^\circ\text{C}$ ) éjecteur, torche
- Vapeur **BP** (basse pression  $P = 3\text{bar}$  jusqu'à  $15\text{ bar}$ ,  $T = 190^\circ\text{C}$ ) échangeur.

### IV.4 Pressions spécifiques à une chaudière

- **La pression de service** : c'est la pression de fonctionnement normale mesurée dans le collecteur principal.
- **Le timbre ou la pression maximale de service (PMS)** : c'est la pression maximale avec laquelle une chaudière peut fonctionner. Elle est aussi équivalente à la pression de calcul qui sert à déterminer l'épaisseur des parois.

Le timbre est gravé sur une plaque apposée par le service des mines.

- **La pression d'épreuve** : c'est la pression à laquelle est effectuée l'épreuve hydraulique de la chaudière pour vérifier sa résistance. Elle est égale à 1.5 fois la PMS.

L'épreuve hydraulique est obligatoire avant la première mise en service de la chaudière, toutes les 10 années et après de grosses réparations.

### IV.5 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.

#### IV.5.1 Diagramme thermodynamique

Le terme diagramme thermodynamique, il fait référence à un diagramme (généralement en 2 ou 3 dimensions), dans laquelle en tant que les coordonnées apparaissent 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.

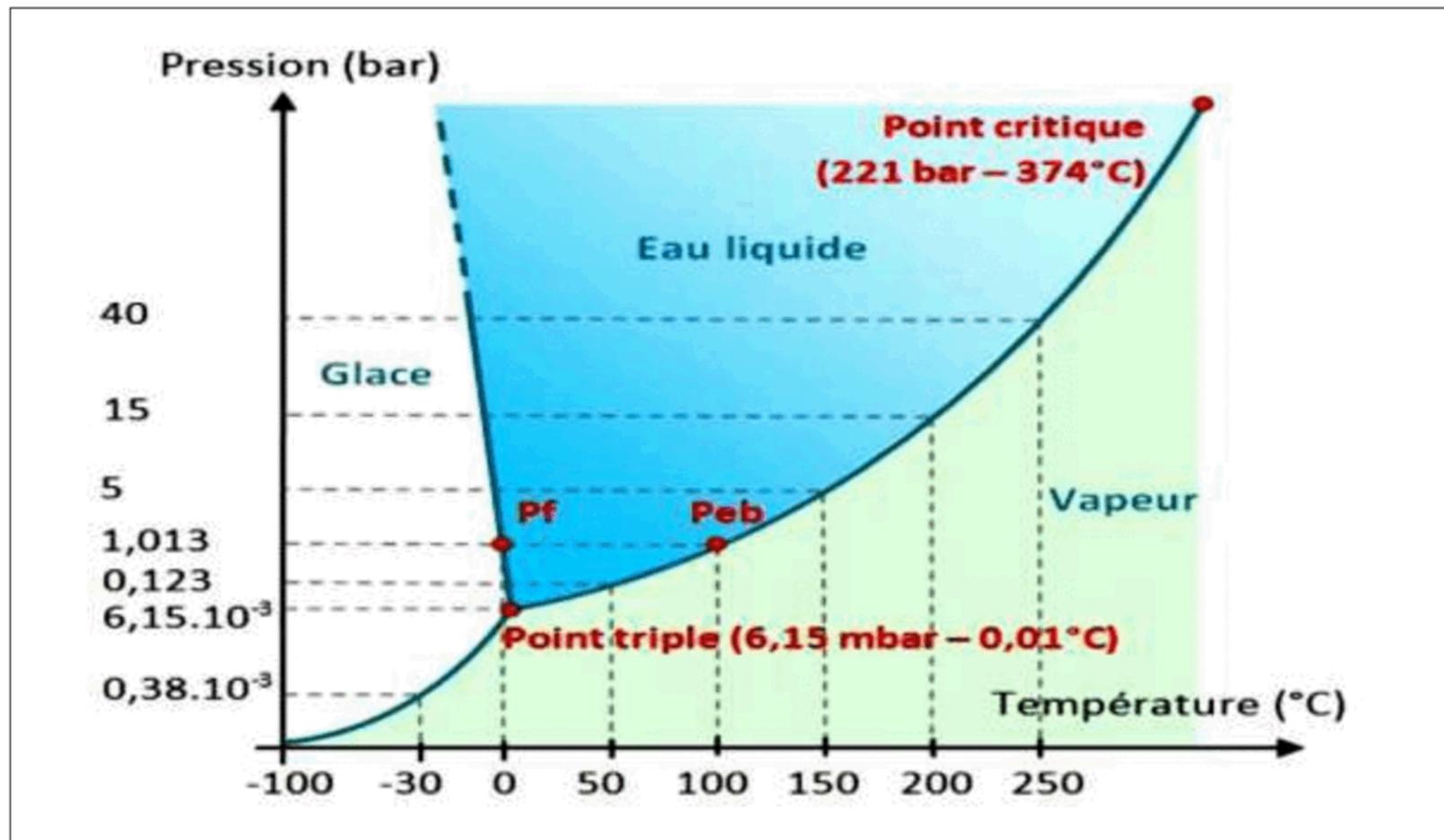


Figure IV.1 : Diagramme des phases

### IV.5.2 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  $\text{KJ/Kg. K}$
- 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.

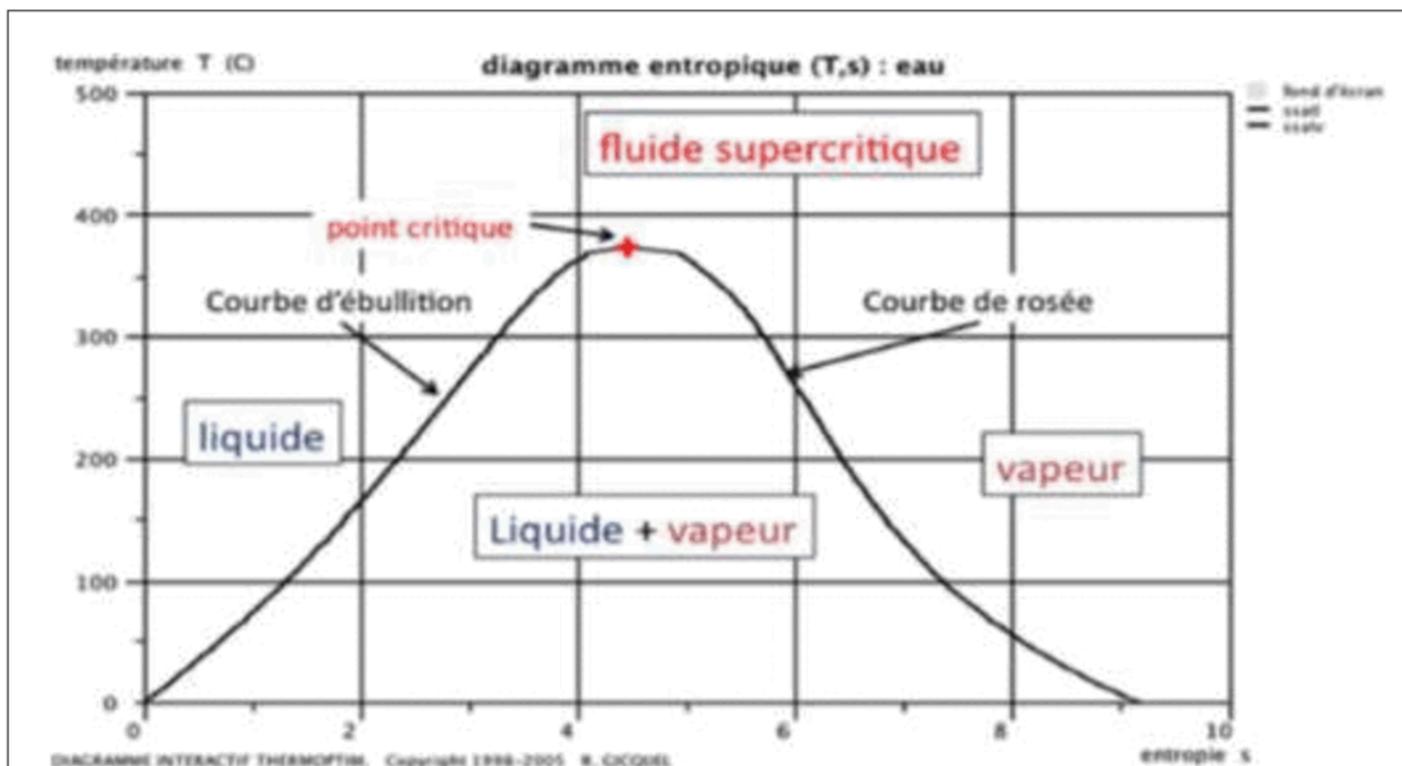


Figure IV.2 : Diagramme entropique

### IV.5.3 Les propriétés de la vapeur

La pression P (en bar ou en Pa).

La température T (en °C).

L'enthalpie h (en kJ/kg).

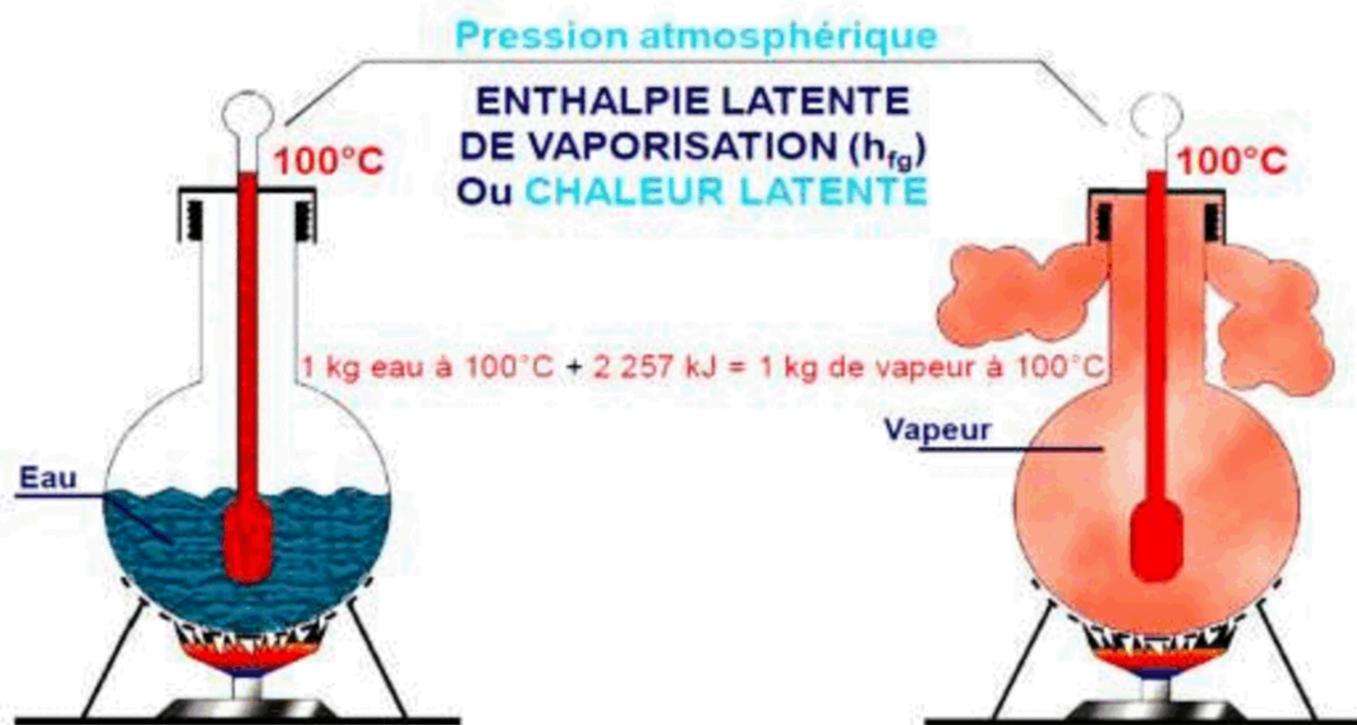
Le volume spécifique v (en m<sup>3</sup>/kg).

Toutes ces propriétés dépendent les unes des autres et peuvent se trouver dans les tables de la vapeur (Tableau IV.1)

Tableau IV.1 : Propriétés de la vapeur

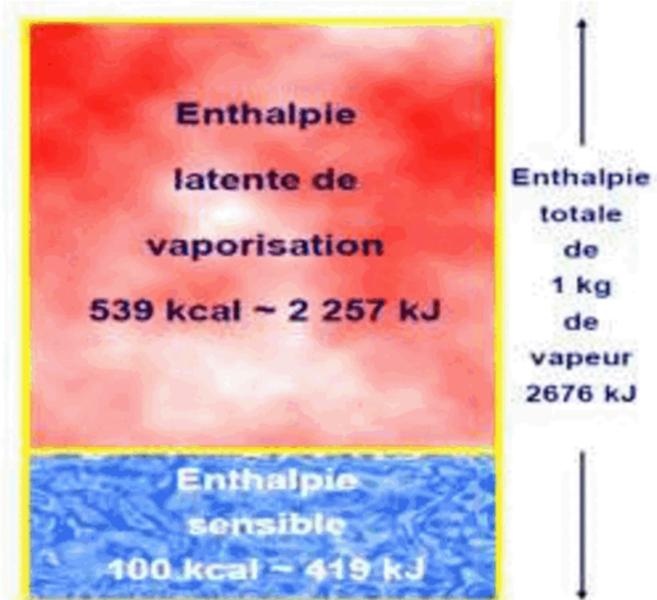
Pression effective bar	Température d'ébullition °C	Enthalpie sensible		Enthalpie latente		Enthalpie totale		Volume spécifique m <sup>3</sup> /kg	Poids spécifique kg/m <sup>3</sup>
		kcal/kg	kJ/kg	kcal/kg	kJ/kg	kcal/kg	kJ/kg		
0,0	100,00	100,10	419,04	539,17	2257,0	639,27	2676,0	1,673	0,5977
0,2	105,10	105,30	440,8	535,92	2243,4	641,23	2684,2	1,414	0,7072
0,4	109,55	109,81	459,7	533,03	2231,3	642,85	2691,0	1,225	0,8163
0,6	113,56	113,80	476,4	530,03	2220,4	644,24	2696,8	1,083	0,9233
0,8	117,14	117,43	491,6	528,06	2210,5	645,50	2702,1	0,971	1,0298
1,0	120,42	120,78	505,6	525,82	2201,1	646,60	2706,7	0,881	1,1350
1,5	127,62	128,06	536,1	521,02	2181,0	649,09	2717,1	0,714	1,4005
2,0	133,69	134,30	562,2	516,79	2163,3	651,09	2725,5	0,603	1,6583
2,5	139,02	139,75	585,0	513,04	2147,6	652,79	2732,6	0,522	1,9157
3,0	143,75	144,60	605,3	509,65	2133,4	654,25	2738,7	0,461	2,1691
3,5	148,02	148,97	623,6	506,52	2120,3	655,49	2743,9	0,413	2,4213
4,0	151,96	153,05	640,7	503,60	2108,1	656,66	2748,8	0,374	2,6737
4,5	155,55	156,78	656,3	500,88	2096,7	657,66	2753,0	0,342	2,9239
5,0	158,92	160,27	670,9	498,32	2086,0	658,60	2756,9	0,315	3,1746
5,5	162,08	163,54	684,6	495,86	2075,7	659,41	2760,3	0,292	3,4246
6,0	165,04	166,62	697,5	493,54	2066,0	660,17	2763,5	0,272	3,6764
6,5	167,83	169,54	709,7	491,35	2056,8	660,89	2766,5	0,255	3,9215
7,0	170,50	172,33	721,4	489,17	2047,7	661,51	2769,1	0,240	4,1666
7,5	173,02	174,98	732,5	487,14	2039,2	662,13	2771,7	0,227	4,4052
8,0	175,43	177,52	743,1	485,16	2030,9	662,68	2774,0	0,215	4,6511
8,5	177,75	179,95	753,3	483,25	2022,9	663,21	2776,2	0,204	4,9019
9,0	179,97	182,27	763,0	481,39	2015,1	663,66	2778,1	0,194	5,1546
9,5	182,10	184,56	772,5	479,57	2007,5	664,11	2780,0	0,185	5,4054
10,0	184,13	186,71	781,6	477,80	2000,1	664,52	2781,7	0,177	5,6497

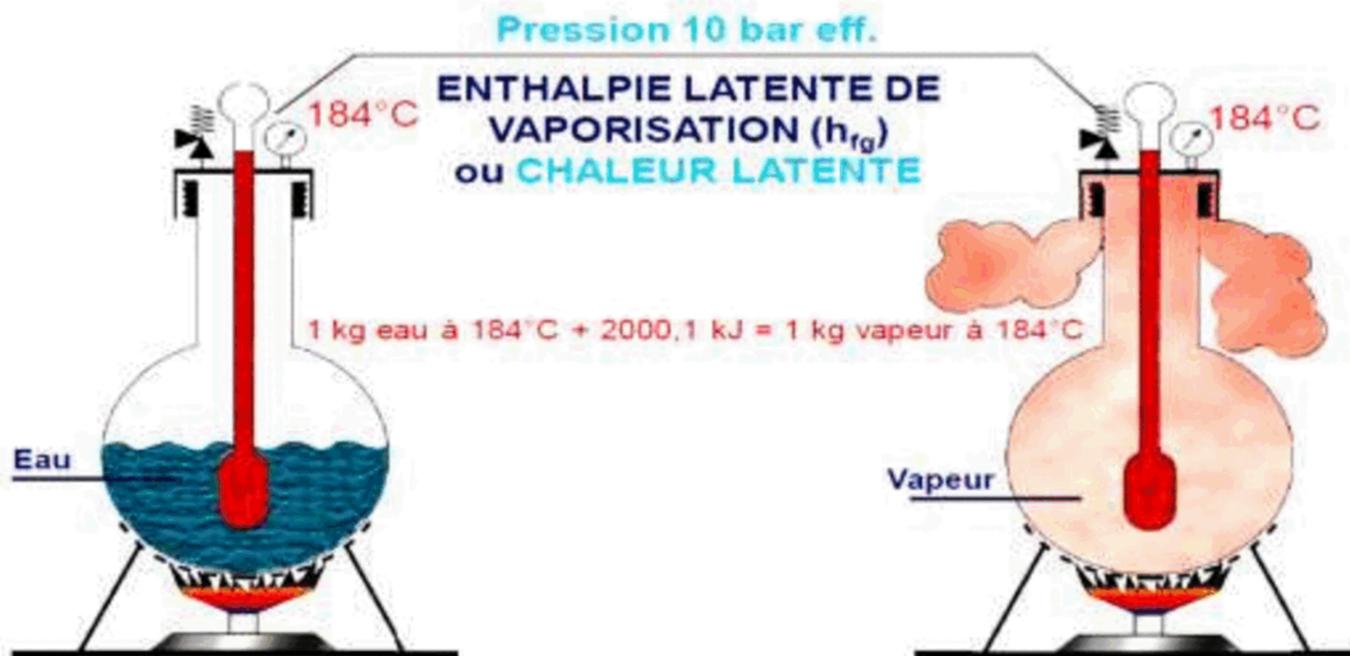
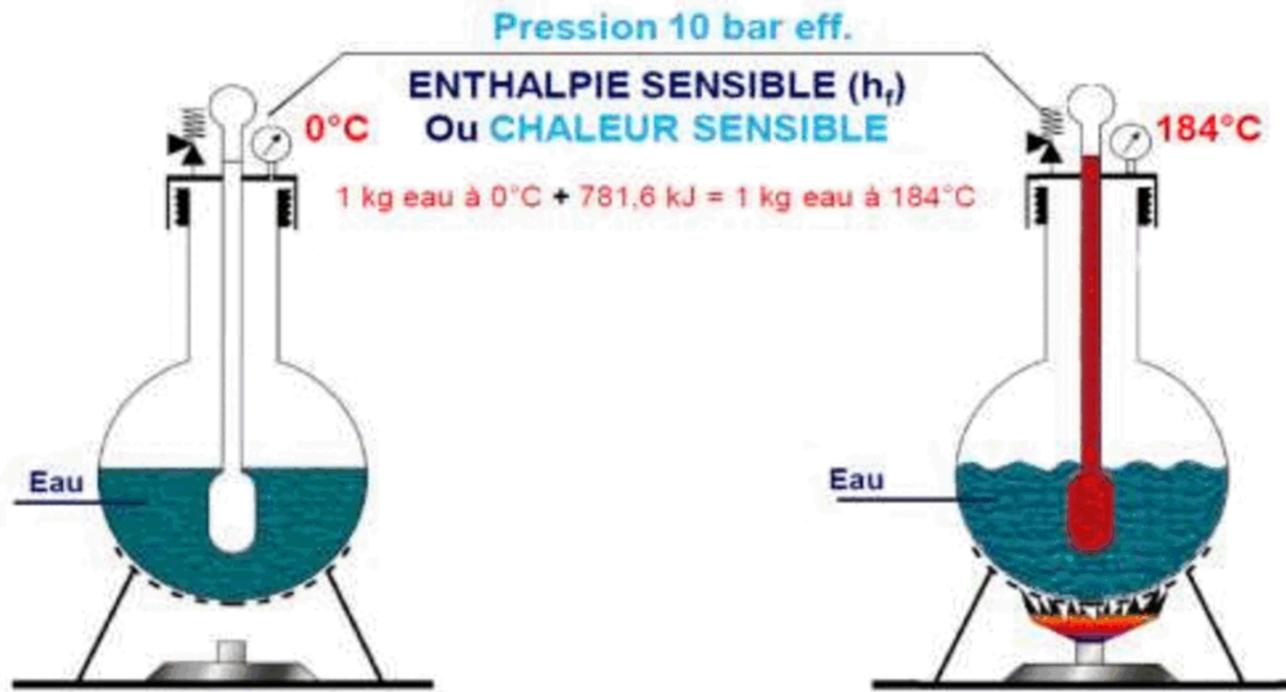
IV.5.3.1 Formation de la vapeur



Pression atmosphérique

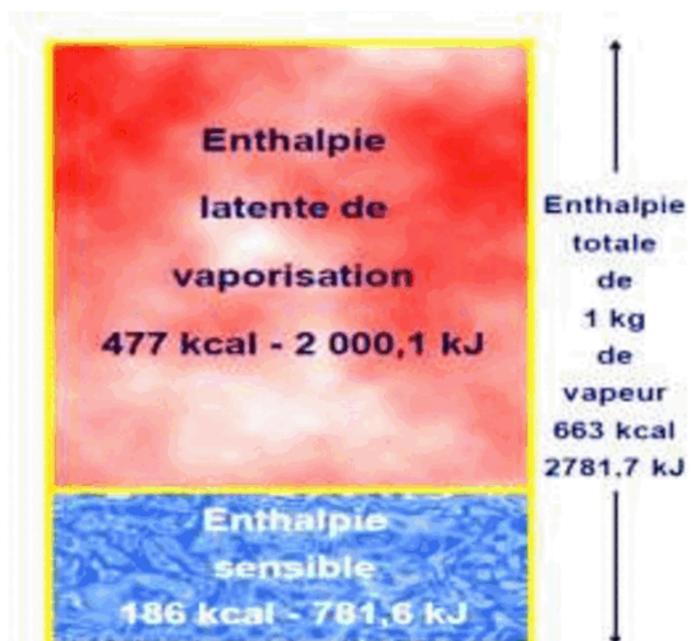
$$h_g = h_f + h_{fg}$$



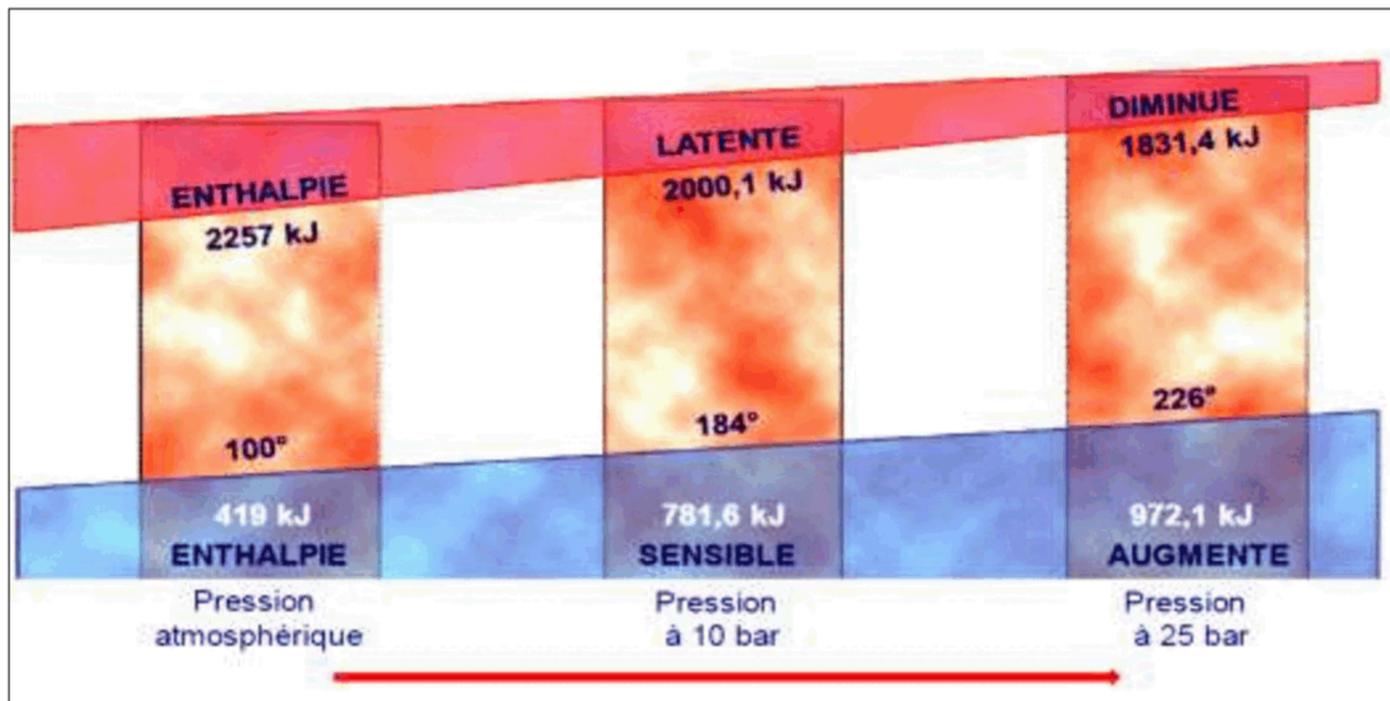


Pression 10 bar eff.

$$h_g = h_f + h_{fg}$$



### IV.5.3.2 Effet de l'augmentation de la pression



### IV.5.4 Utilisation de la vapeur

La vapeur est élément indispensable dans une raffinerie, d'une usine chimique ou pétrochimique pour assurer le bon fonctionnement des unités de production. Elle est pour rôle

- **D'intervenir dans les procédés** (vapeur de stripping, vapeur de dilution, de fluidisation, d'atomisation de combustible,...) ;
- **D'apporter l'énergie** entraînement mécanique (turbines à vapeur, éjecteurs) ; fluide de chauffage (les réchauffeurs et rebouilleurs)
- **De constitue un élément de sécurité** (vapeur d'étouffement, vapeur de dégazage et inertage des équipements) ;
- **Interventions spéciales** décokage de faisceaux de four (vapeur et air).

### IV.6 Différents types de chaudières

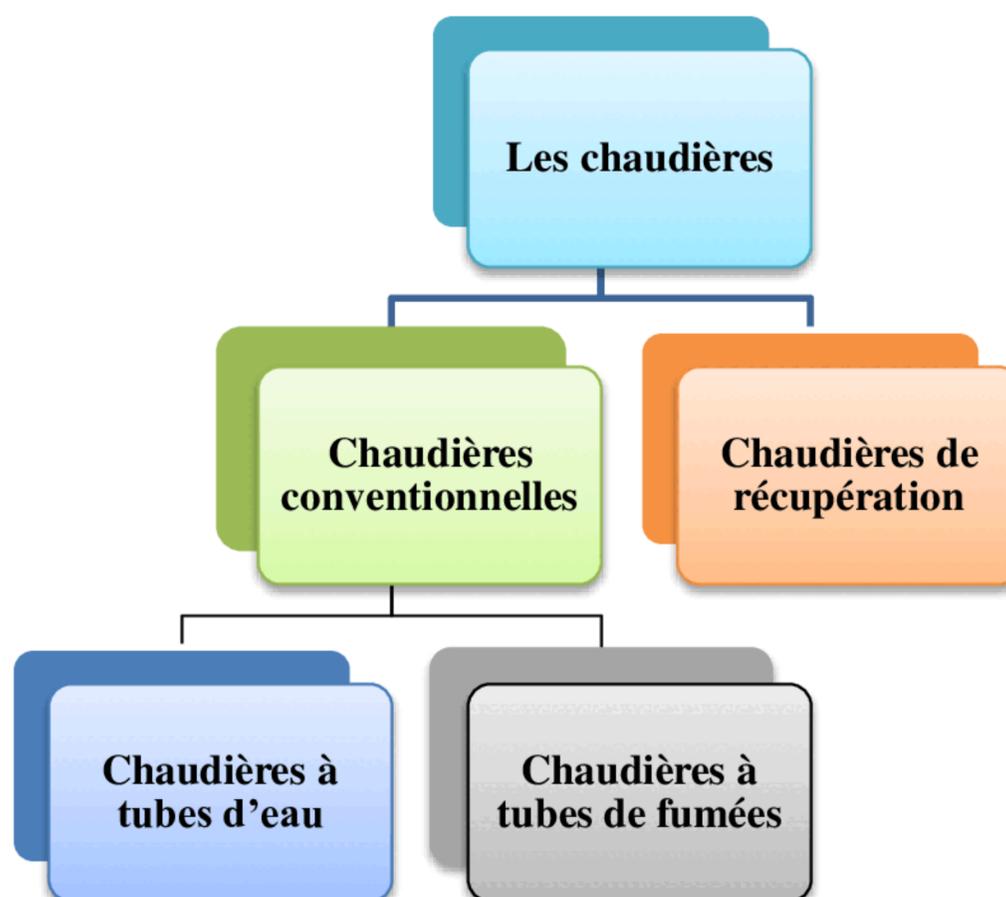
Les chaudières industrielles peuvent être classées suivant leurs conceptions en deux catégories principales :

- **Les chaudières conventionnelles** : dans lesquelles la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau est fournie par combustion de liquides ou de gaz. Selon que l'eau ou les fumées circulent à l'intérieur d'un faisceau tubulaire dans les chaudières conventionnelles, on distingue **les chaudières à tubes d'eau** et **les chaudières à tubes de fumées** (dénommées d'après le fluide qui circule à l'intérieur des tubes).

➤ **Les chaudières de récupération** : utilisant la chaleur disponible dans des fluides de procédés à haute température ou dans les fumées de fours ou de turbines à gaz.

En fonction de la nature des fluides et de leurs conditions de disponibilité, les chaudières de récupération peuvent être construites comme les chaudières conventionnelles, n'en utiliser que des éléments ou encore faire l'objet d'une technologie spéciale.

On distingue aussi 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 IV.3** : Différents types de chaudières

### IV.6.1 Chaudière à tubes d'eau

C'est le type de chaudière le plus commun et le plus utilisé dans l'industrie. On estime qu'environ 80% du parc chaudières sont des chaudières à tubes d'eau.

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



**Figure IV.4 :** Chaudière à tubes d'eau

### IV.6.1.1 Éléments constitutifs d'une chaudière tubes à eau

#### IV.6.1.1.1 L'écran de tubes

Les parois d'une chaudière à tubes d'eau sont constituées de panneaux de tubes munis d'ailettes longitudinales opposées permettant de les souder entre eux et de réaliser ainsi une construction étanche.



**Figure IV.5 :** L'écran de tubes

Ces parois délimitent le volume dans lequel les gaz de combustion circulent le long des surfaces d'échanges.

A l'extrémité de la chambre de combustion des tubes sont déformés en sorte que, disposés en quinconce, ils permettent l'accès des fumées à la zone de convection.

Les schémas suivants (figures IV.6 et figures IV.7) en montrent une vue de face et une coupe dans un plan horizontal.

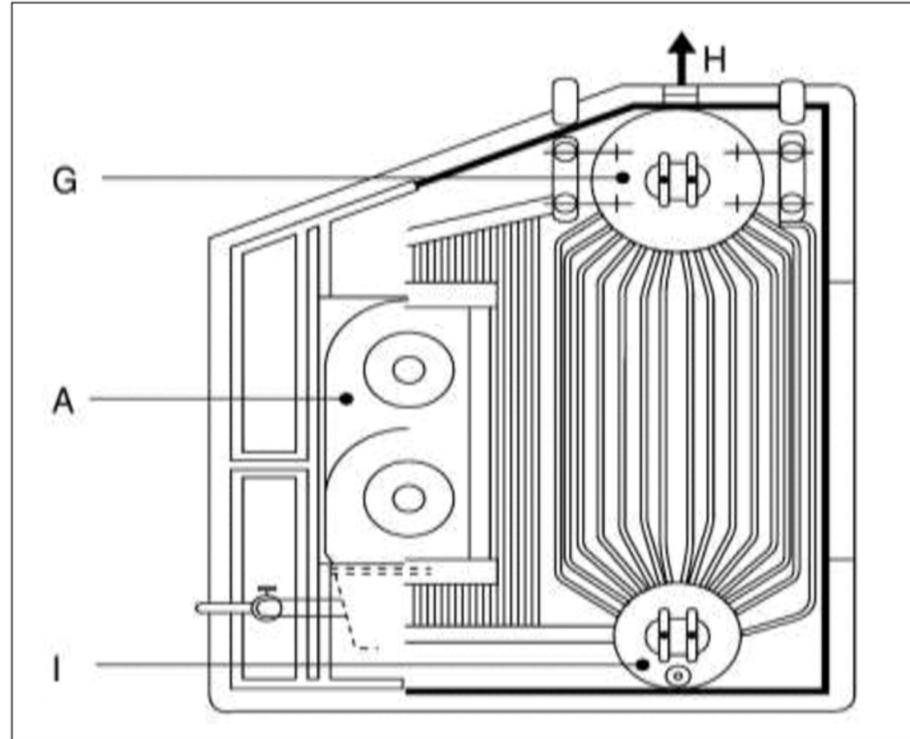


Figure IV.6 : Vue de face d'une chaudiere

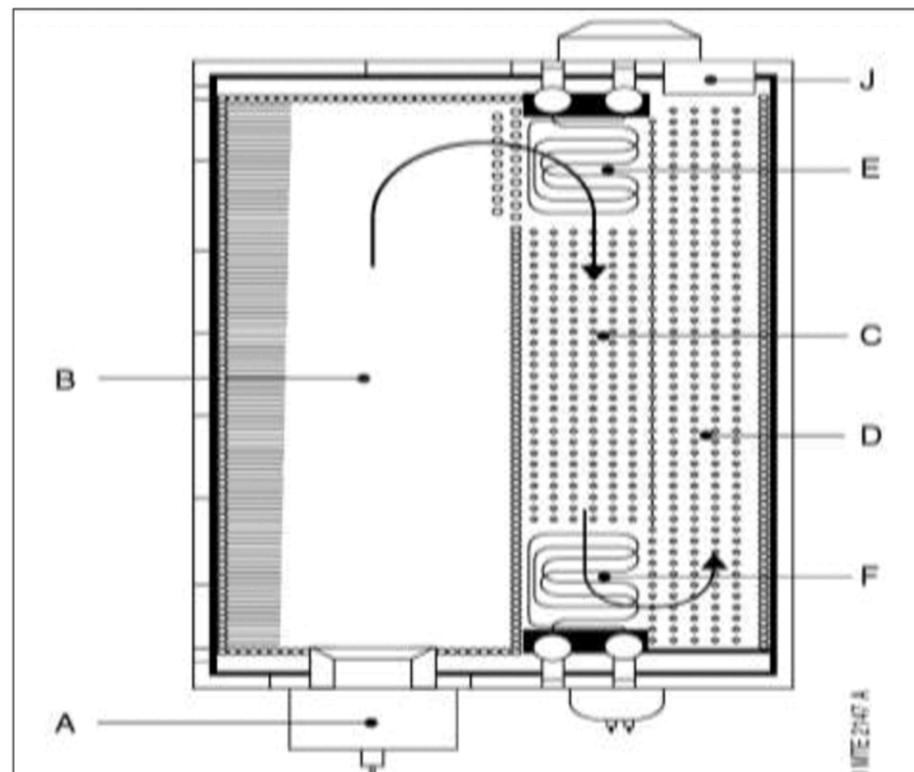


Figure IV.7 : Schéma d'une chaudière vue de haut

A : Brûleurs

B : Foyer

C : Tube convection descendant

D : Tube convection ascendant

E : Surchauffeur primaire

F : Surchauffeur secondaire

J : Sortie fumées vers cheminée

H : Sortie de vapeur saturée

I : Ballon inférieur

G : Ballon supérieur

On distingue :

### IV.6.1.1.2 Les brûleurs (A)

C'est l'élément mécanique qui assure la production de chaleur en assurant le mélange d'un combustible avec de l'air (comburant) produisant ainsi une combustion. Il a donc un rôle déterminant dans la qualité de la combustion, et par suite dans l'émission de polluants ou d'imbrûlés en plus ou moins grande quantité dans les fumées.

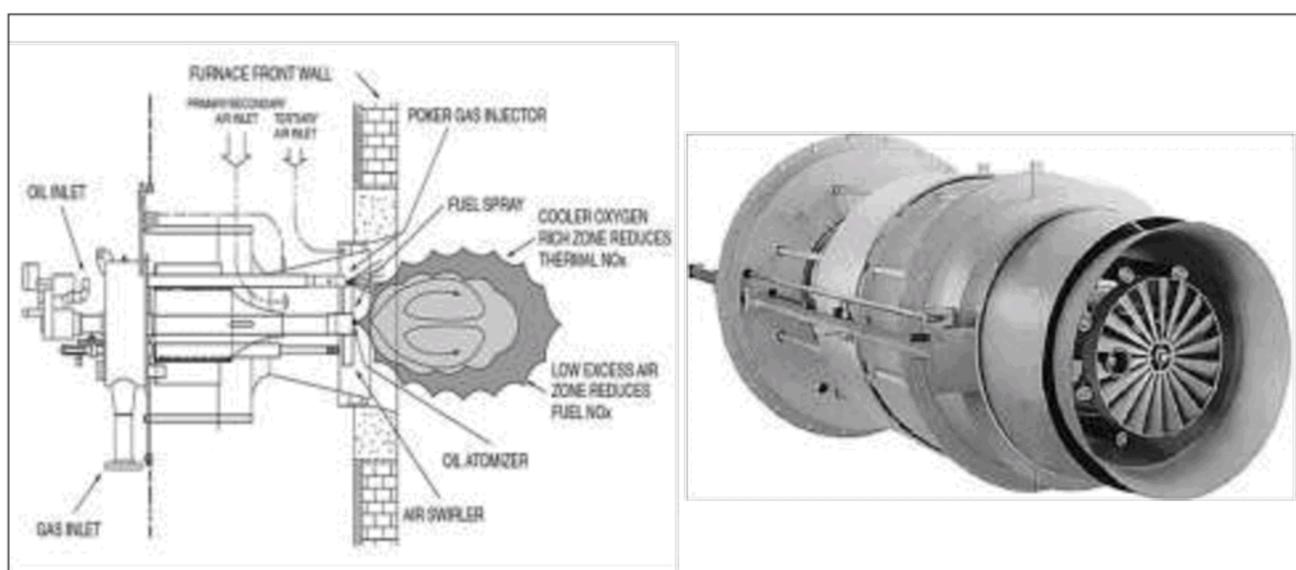
Le rôle du brûleur est en général double :

- Assurer le mélange carburant-comburant dans les proportions choisies (par exemple, selon un rapport air-gaz ou avec un léger excès d'air)
- Réaliser la combustion de ce mélange dans les conditions optimales (allumage et maintien de la flamme, combustion complète).

En résumé, assurer la règle des « **4T** »

#### La règle des « **4T** »

- Assurer une **TENEUR** optimale de l'air/ou combustible.
- Maintenir la **TEMPERATURE** de combustion propre à chaque combustible.
- Assurer un bon mélange air-combustible ce qui nécessite une **TURBULENCE** de l'air.
- Assurer le **TEMPS** de combustion de façon à ce que celle-ci s'opère entièrement dans le foyer.



**Figure IV.8 : Les brûleurs**

### IV.6.1.1.3 La chambre de combustion (le foyer) (B)

C'est la chambre dans laquelle se fait la combustion, et se développent les flammes produites par les brûleurs (A). Les tubes jointifs qui constituent les parois de la chambre sont soumis au rayonnement des flammes.

- Les brûleurs, insérés dans les parois entre des tubes dévoyés, peuvent être situés au milieu des panneaux (chauffe en façade) ou dans les angles (chauffe tangentielle) pour donner une turbulence importante aux flammes au centre de la chambre de combustion.
- L'air de combustion, poussé par un ventilateur est distribué aux brûleurs par un large caisson d'air permettant d'en assurer une bonne distribution.

### IV.6.1.1.4 Le faisceau vaporiseur ou Faisceau de convection

Constitué de tubes nus verticaux fixés à leurs extrémités aux ballons inférieurs et supérieurs. Des chicane placées dans ce faisceau évitent les chemins préférentiels des fumées. Selon la pression de fonctionnement, le faisceau vaporiseur représente une part plus ou moins importante de la surface d'échange réservée à la vaporisation de l'eau. En effet, la chaleur latente de changement d'état de l'eau étant d'autant plus faible que la pression est plus élevée, la surface totale d'échange nécessaire pour vaporiser l'eau est d'autant plus réduite que le timbre de la chaudière est plus élevé. Au-delà de 80 à 100 bar, la surface des parois de la chambre de combustion suffit à elle seule pour assurer ce service (chaudière radiantes).

- ✓ Comprenant deux parcours pour les fumées.

Dans le premier parcours (C) se trouvent placés les surchauffeurs E et F. Le deuxième parcours (D) achève la récupération de chaleur sur les fumées.

Les tubes constituant les parois de la chaudière et les zones d'échange C et D aboutissent à deux ballons :

### IV.6.1.1.5 Le ballon supérieur ou ballon vapeur (G)

Réalise la séparation des deux phases liquide et vapeur. La vapeur saturée sort par H en haut du ballon avant d'alimenter les surchauffeurs.

Il est constitué d'une enveloppe métallique cylindrique, il se caractérise par son volume important qui permettra de disposer d'un stockage de vapeur et de minimiser les fluctuations du niveau d'eau provoquées par les modifications soudaines de la demande en vapeur.

## Chapitre IV : Les Chaudières Industrielles

Il est aussi doté de trois rampes de répartition (introduction de l'eau d'alimentation, injection de réactifs et extraction de purges), d'aménagements internes pour la séparation de l'eau et de la vapeur (démisters et chicanes) et des équipements réglementaires de sécurité (soupapes, niveaux de lecture et manomètres). Le niveau d'eau dans le ballon supérieur est réglé à 50%.

### IV.6.1.1.6 Le ballon inférieur (I)

Alimente en eau liquide tous les tubes dans lesquels l'eau soumise à l'apport de chaleur se vaporise partiellement avant de retourner au ballon supérieur.

Le ballon inférieur est un cylindre constitué d'une enveloppe métallique, son rôle est de collecter l'eau arrivant des tubes descendant et de le distribuer vers les tubes vaporisateurs. Ce ballon est rempli à 100 % d'eau.

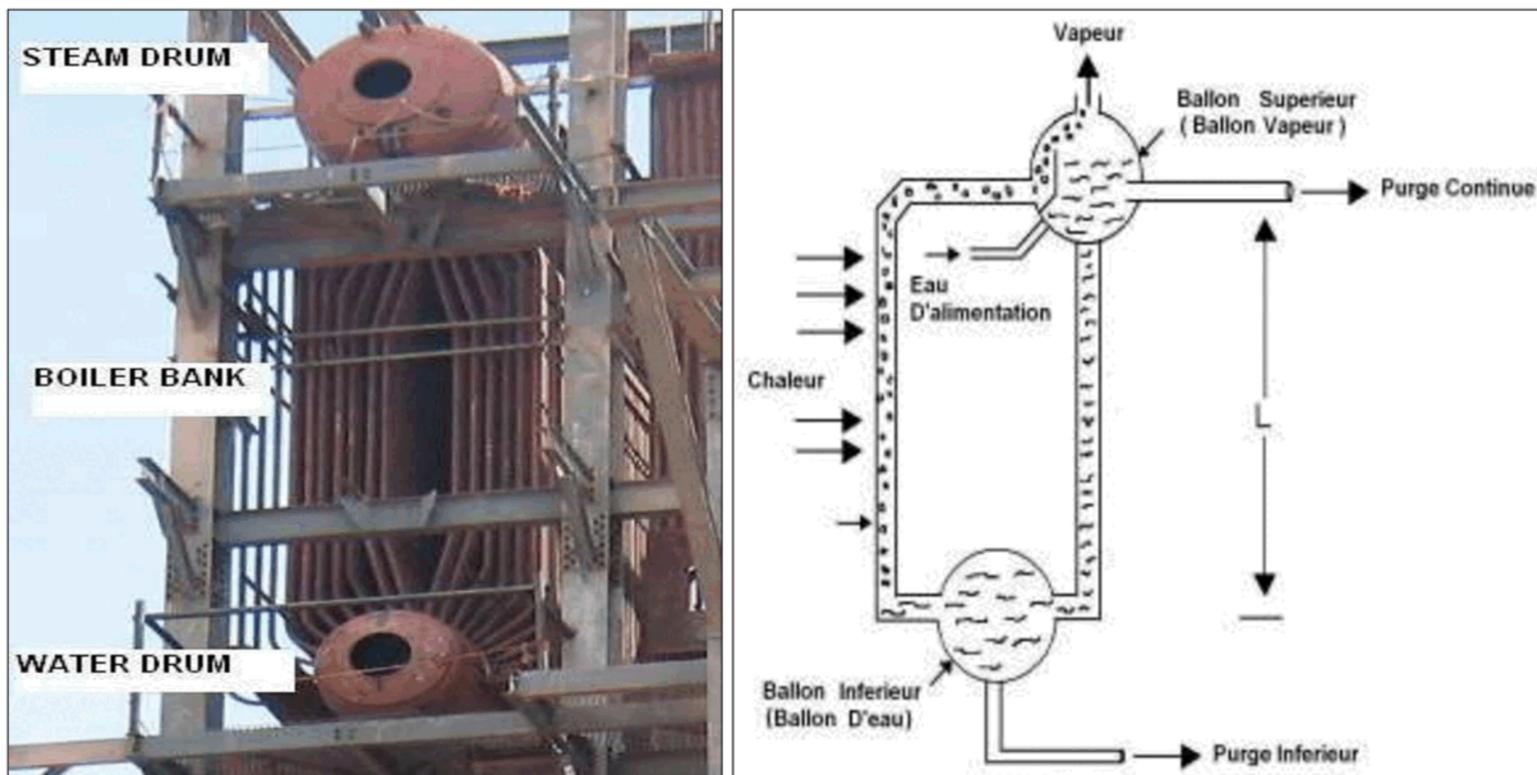
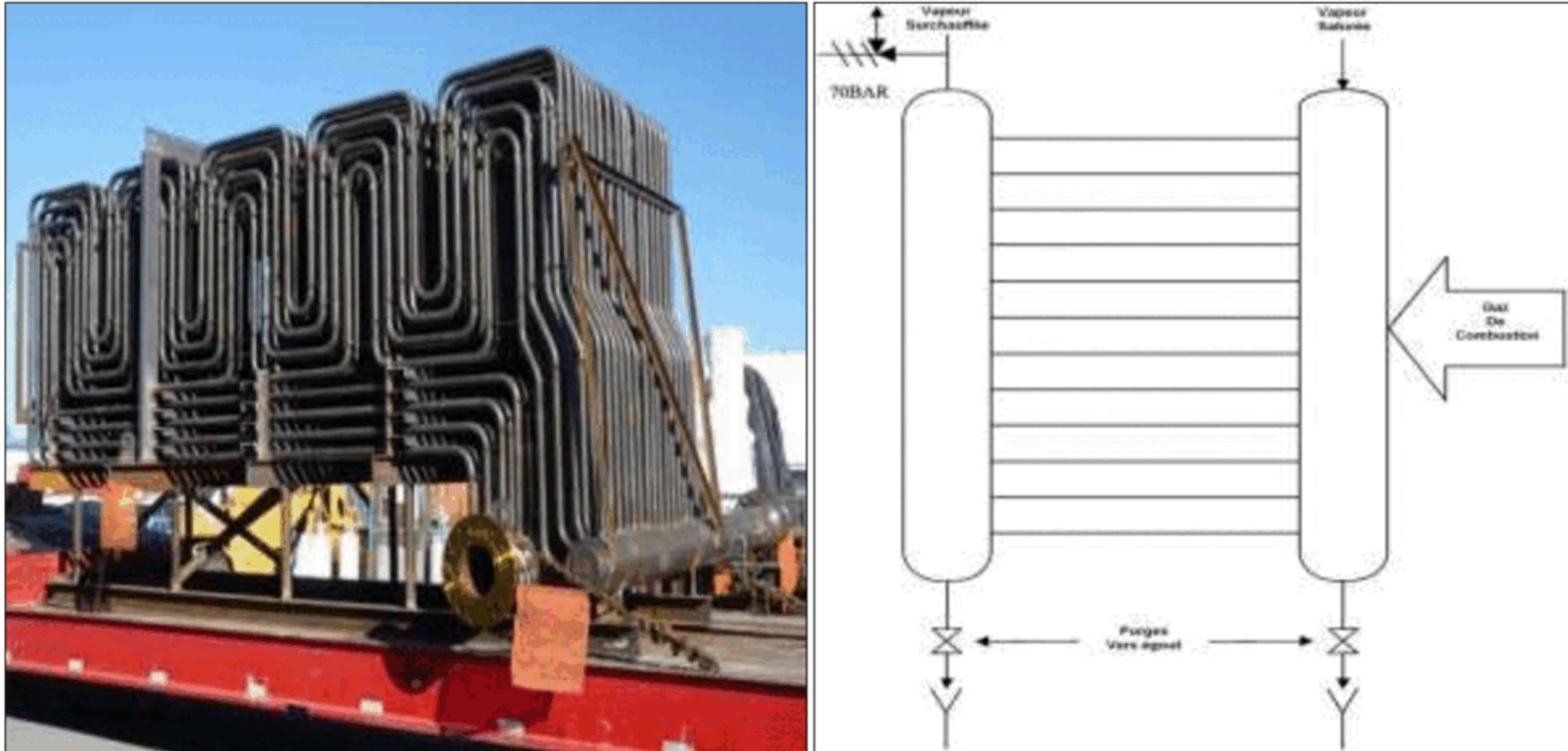


Figure IV.9 : Les ballons de chaudière

### IV.6.1.1.7 Le surchauffeur

Non soumis au rayonnement des flammes mais chauffé par convection grâce aux gaz de combustion qui le traversent.

Souvent agencé en deux éléments séparés par le désurchauffeur pour la régulation de température de la vapeur, le surchauffeur est constitué de faisceaux en parallèle de tubes nus fixés à des collecteurs situés en dehors des gaz de combustion au-dessus du plafond de la chaudière.



**Figure IV.10 : Surchauffeur**

### IV.6.1.1.8 Désurchauffeur

C'est un système d'injection d'eau par pulvérisation qui permet de régler la température finale de la vapeur surchauffée

### IV.6.1.1.9 L'économiseur

Constitué d'un faisceau de tubes le plus généralement nus (équipés d'ailettes dans les cas peu fréquents de combustibles propres), il permet de préchauffer l'eau alimentaire avant sa vaporisation. Selon la température des fumées et celle de l'eau alimentaire (éventuellement réchauffée à la vapeur avant son entrée à la chaudière), la chaudière peut être équipée ou non d'un économiseur.



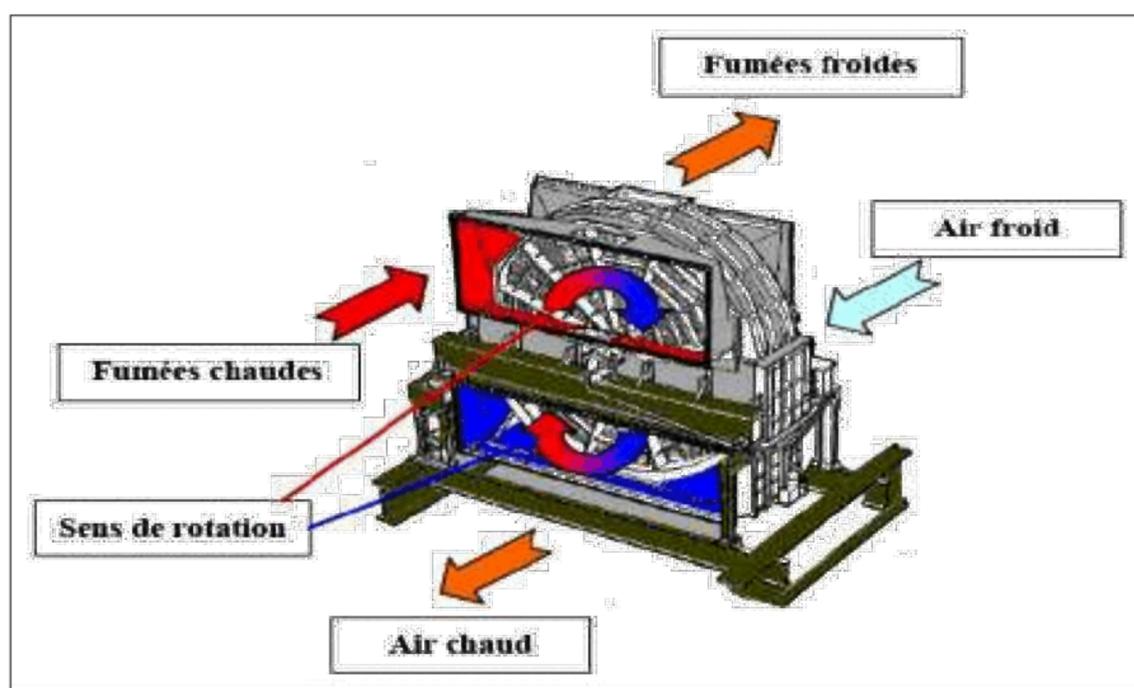
**Figure IV.11 : Economiseur**

### IV.6.1.1.10 Réchauffeur d'air

Pour lequel deux types sont rencontrés : statiques et régénératifs.

*Les réchauffeurs d'air statiques* fonctionnent sur le principe des échangeurs de chaleur par surface interposée entre l'air et les fumées. Ils comportent un faisceau tubulaire dans lequel circule le plus généralement l'air de combustion, les fumées circulant à l'extérieur.

*Les réchauffeurs régénératifs* comportent des masses mobiles (stator constitué de lamelles de tôle, tapis métallique) circulant alternativement dans les fumées qui les réchauffent et dans l'air auquel elles cède la chaleur acquise.



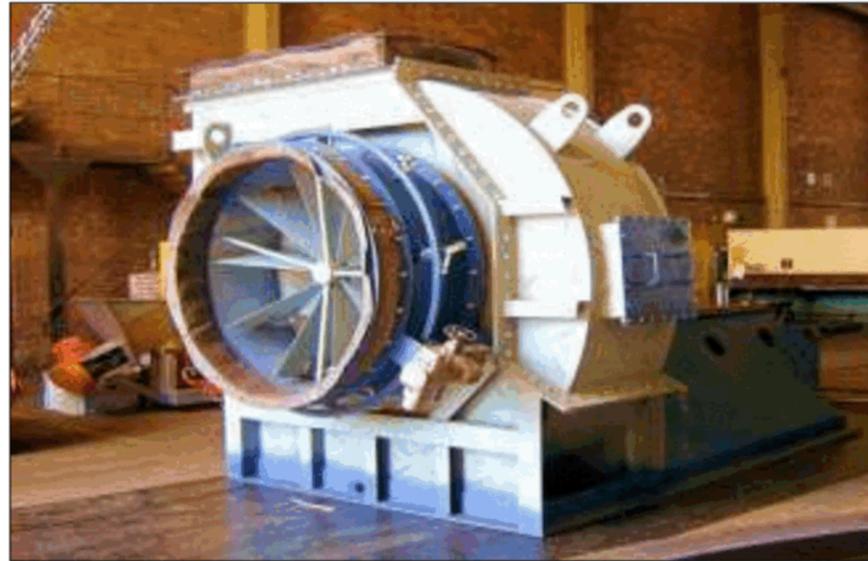
**Figure IV.12 : Réchauffeur d'air**

### IV.6.1.1.11 Le ventilateur de soufflage

La chaudière fonctionne sous une pression positive (pressurisée) avec de l'air de combustion fourni par un ventilateur à tirage forcé.

Ce ventilateur alimente également la soufflante qui fournit l'air à l'allumeur. Il est entraîné par un moteur électrique alimenté par le courant électrique de secours.

La quantité d'air entrant dans le ventilateur est limitée de façon à maintenir un rapport air/combustible correct au niveau du brûleur. Si la quantité d'air de combustion en excès est inférieure à 10% pour le combustible gazeux ou à 15% pour l'essence, il y aura une combustion incomplète. Les hydrocarbures non brûlés pourraient prendre feu dans la cheminée ou exploser et pourraient donc risquer d'endommager sérieusement la chaudière.



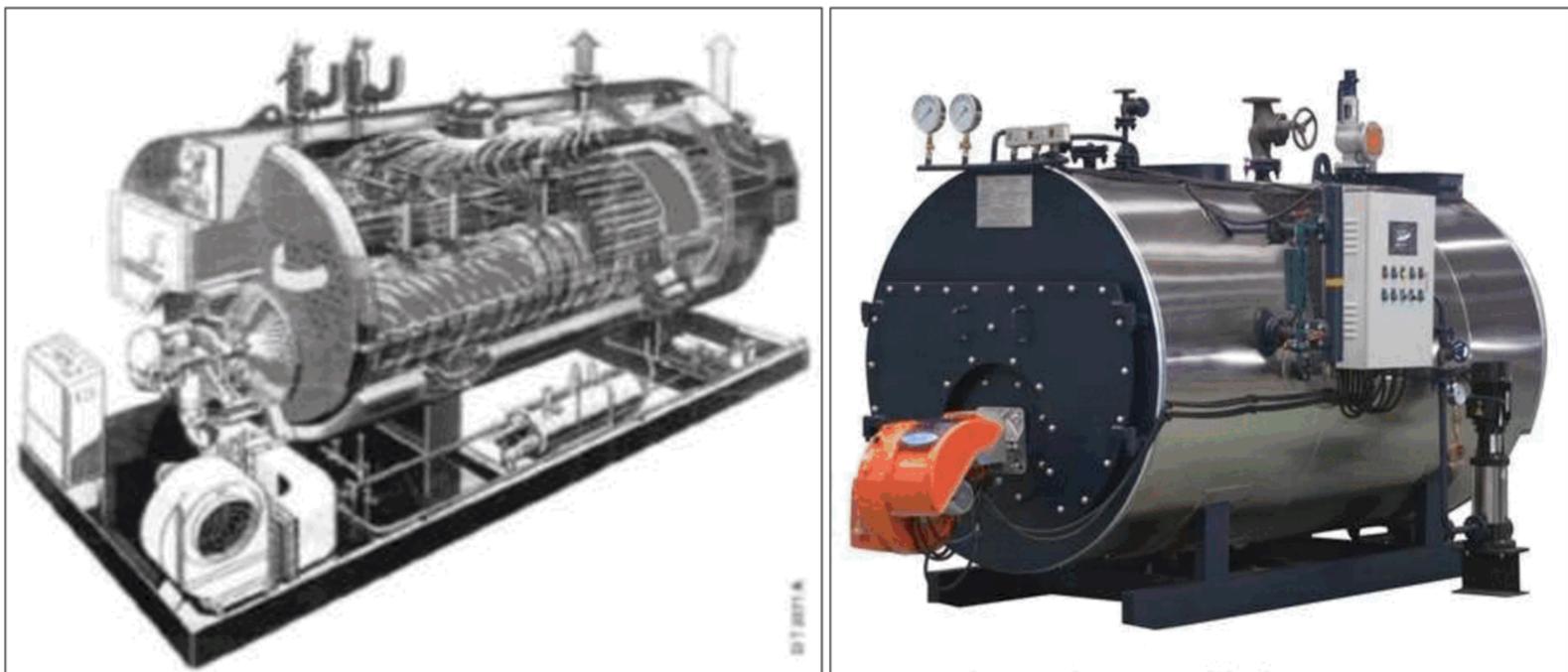
**Figure IV.13 :** Le ventilateur de soufflage

### IV.6.2 Chaudières à tubes de fumées

#### IV.6.2.1 Définition

Les chaudières à tubes de fumées sont le plus généralement des petites chaudières (production inférieure à 25 t/h) générant de la vapeur saturée à une pression inférieure à une vingtaine de bars.

Les chaudières de type Scotch marines sont le plus commun de la chaudière à tubes de fumée industrielle. Elles sont considérées comme un outil de travail de l'industrie en raison de leurs faible coût initial et leurs haute efficacité et durabilité.



**Figure IV.14 :** Chaudières à tubes de fumées

### IV.6.2.2 Elément d'une chaudière à tube de fumées

Elles sont composées de :

- **le brûleur** avec son ventilateur d'air,
- **le tube de foyer** en tôle d'acier ondulée, supporté par deux plaques tubulaires, dans lequel se développe la flamme,
- **des faisceaux tubulaires** formant le trajet de fumées. Les tubes sont dudgeonnés dans les plaques tubulaires du tube de foyer.
- **une boîte d'inversion des fumées arrière** permettant de distribuer celles-ci dans le faisceau tubulaire
- **une boîte de fumées avant** (côté brûleur) permet aux fumées de traverser en deux passes le faisceau tubulaire avant leur rejet à une cheminée.
- **une boîte de sortie des fumées arrière** équipée d'un déflecteur situé au-dessus du plan d'eau pour limiter l'entraînement de gouttelettes de liquide.
- **la sortie de vapeur saturée** équipée d'un déflecteur situé au-dessus du plan d'eau pour limiter l'entraînement de gouttelettes de liquide.

Cet ensemble est monté dans un corps cylindrique calorifugé.

Le schéma ci-dessous présente la vue éclatée d'une chaudière à tubes de fumées sur laquelle on peut distinguer les différents éléments :

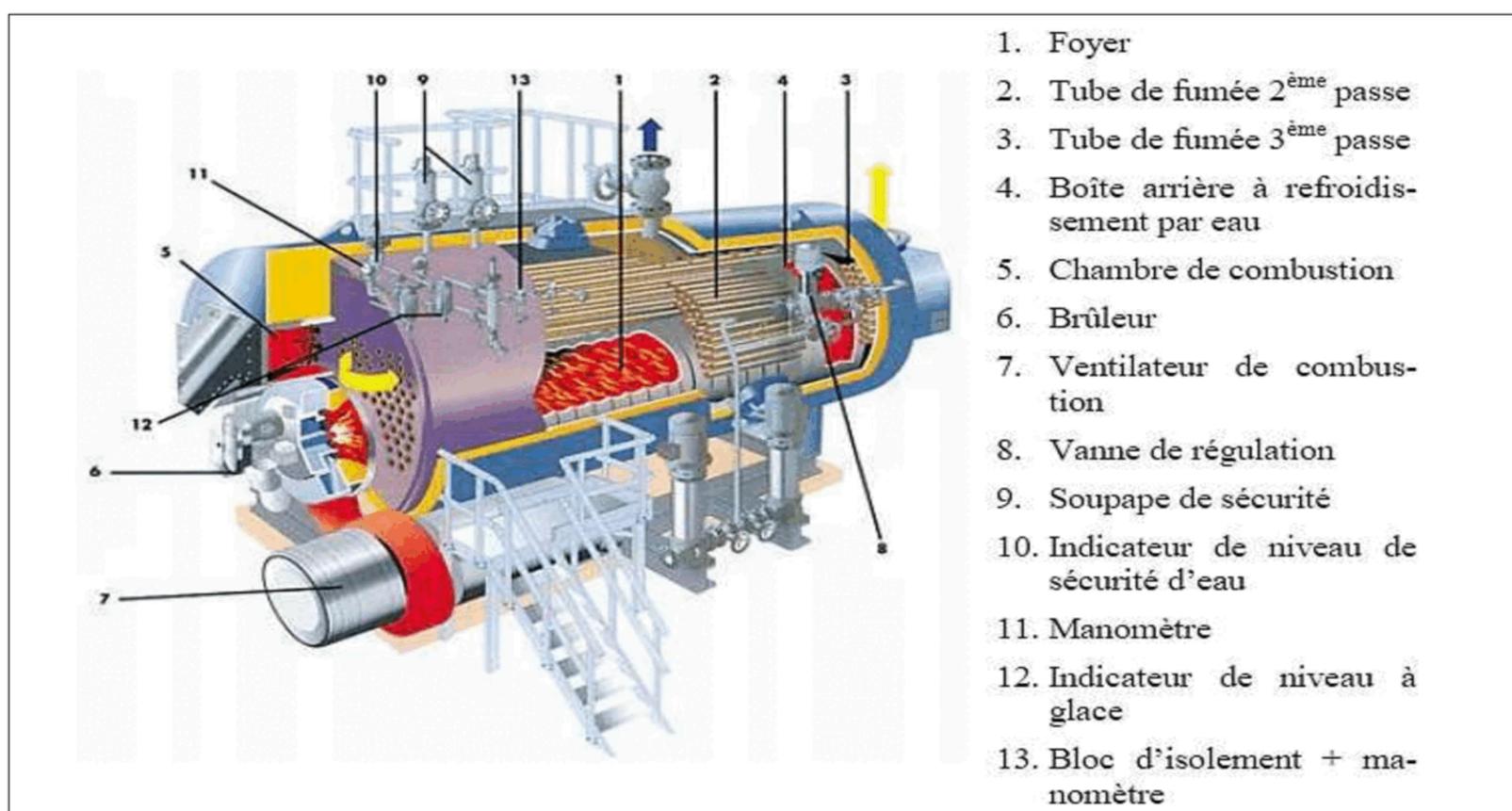


Figure IV.15 : Composants d'une chaudière

**IV.6.2.3 Fonctionnement**

L'alimentation en eau est effectuée à la partie inférieure de la calandre, le faisceau tubulaire étant entièrement noyé dans l'eau liquide.

Certaines chaudières comportent dans une boîte de fumées un échangeur permettant de surchauffer d'une dizaine de degrés la température de la vapeur produite, ceci afin d'éviter l'apparition de condensats lors du transport de la vapeur de la chaudière à son utilisation.

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 bruleur. 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.

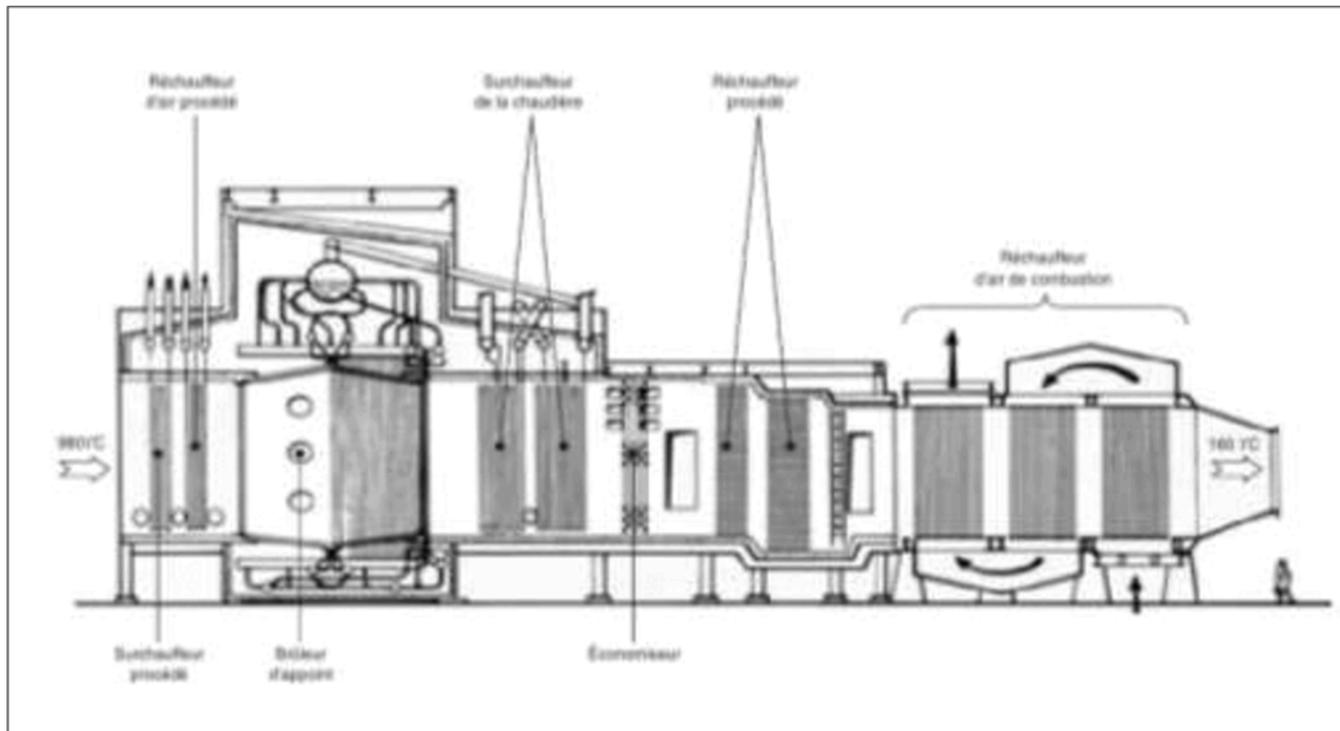
**Tableau IV.2 : Propriétés des chaudières à tubes de fumée et à tubes d'eau**

<b>Propriétés</b>	<b>Chaudières à tubes de fumée</b>	<b>Chaudières à tubes d'eau</b>
<b>Mise en route (à puissance équivalente)</b>	Lente (grand volume d'eau à chauffer)	Rapide
<b>Adaptation aux changements de régime</b>	Médiocre (inertie importante)	Bonne
<b>Surface de chauffe</b>	Moyenne	Élevée
<b>Sécurité</b>	Médiocres	Bonne
<b>Encombrement</b>	Faible	Fort
<b>Prix</b>	Limité	Élevé
<b>Applications usuelles</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Puissance</li> <li>▪ Débit</li> <li>▪ Timbre (pression max d'utilisation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Moyennement élevée                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1,5 à 25 t/h</li> <li>▪ 10 à 20 bar</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Importante                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 4 à 200 t/h</li> <li>▪ 90 à 100 bar (en circulation naturelle) et jusqu'à 225 bar</li> </ul> </li> </ul>

### IV.6.3 Chaudières de récupération

La technologie est spécifique et plus ou moins éloignée de celle des chaudières conventionnelles comme le montrent les exemples suivants :

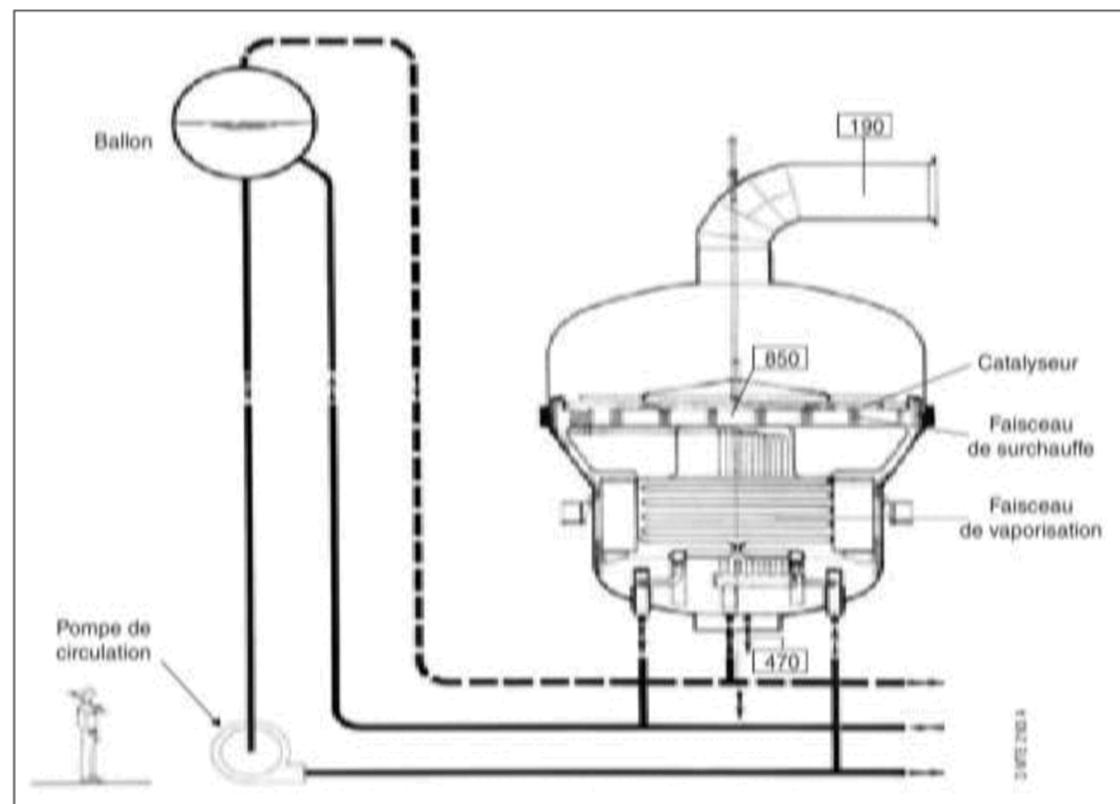
- **Chaudières de récupération** sur les fumées d'un four de reformage primaire **d'une usine d'ammoniac.**



**Figure IV.16 :** Chaudières de récupération de procédés reformage primaire

La chaleur sensible des fumées à 980°C ne suffisant pas à produire le débit de vapeur nécessaire à l'atelier, la chaudière est équipée de brûleurs additionnels.

- **Chaudières de récupération** sur les gaz de procédé **d'un atelier d'acide nitrique.**



**Figure IV.17 :** Chaudières de récupération d'un atelier d'acide nitrique

Le gaz nitreux  $\text{NO}_2$  servant à la fabrication d'acide nitrique est obtenu par oxydation catalytique de l'ammoniac.

La chaudière a pour but de refroidir les effluents procédés en produisant de la vapeur surchauffée.

### IV.7 Description de fonctionnement de la chaudière process

L'eau à la sortie de la chaîne de déminéralisation, est envoyée dans les bacs de stockages en attendant son utilisation dans les générateurs de vapeur (chaudières).

Le dégazeur reçoit les condensats de son propre train, ensuite on fait une injection d'hydrazine au niveau de ce dégazeur pour l'élimination de l'oxygène dissous dans l'eau.

Ces condensats quittent le dégazeur et pénètrent dans la conduite d'aspiration des pompes d'eau d'alimentation des chaudières.

L'eau pénètre dans la chaudière en passant par un échangeur de chaleur appelé économiseur qui élève la température d'eau de  $109^\circ\text{C}$  à  $170^\circ\text{C}$ . Cette eau sortante de l'économiseur entre dans le ballon supérieur d'où elle circule par un faisceau tubulaire jusqu'au ballon inférieur et retourne au ballon supérieur.

## Chapitre IV : Les Chaudières Industrielles

---

On injecte du phosphate dans le ballon inférieur pour réagir avec les impuretés contenues dans l'eau.

Lorsque l'eau retourne au ballon supérieur, elle a reçu une quantité de chaleur suffisante pour se transformer en vapeur. L'évaporation se passe au niveau des tubes latéraux qui forment la chambre de combustion.

La vapeur saturée est extraite au sommet du ballon supérieur et canalisée vers le surchauffeur primaire qui est un échangeur de chaleur pour élever la température de la vapeur de 285°C à 375°C, ensuite cette vapeur passe dans le surchauffeur secondaire afin d'élever sa température à 441°C.

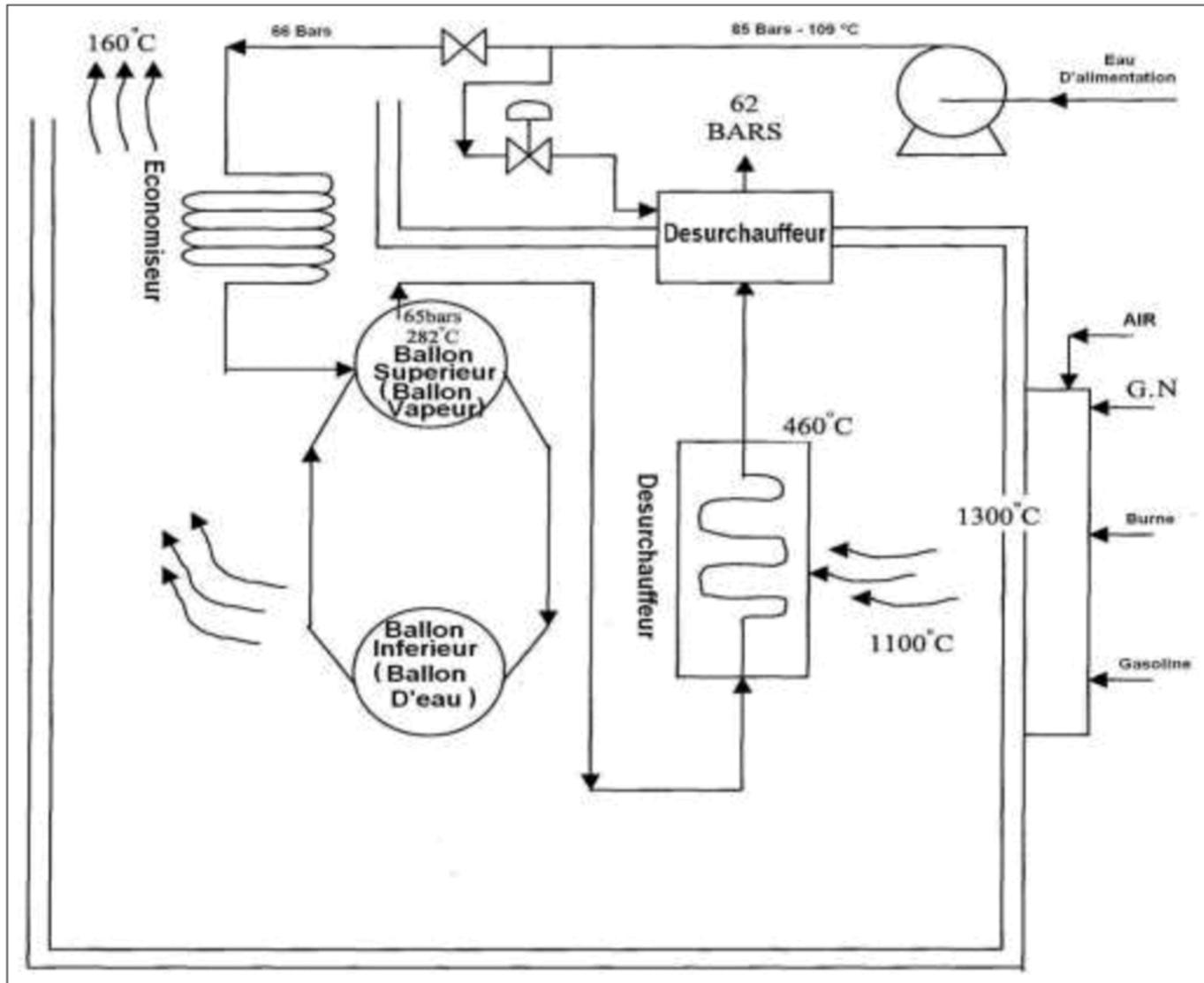
Entre ces deux surchauffeurs il y a un désurchauffeur dont on introduit l'eau d'alimentation pour la régulation de la température de la vapeur à la sortie.

La vapeur quitte la chaudière avec une température de 441 °C et une pression de 62 bars pour entrer dans un collecteur commun 62bars.

Chaque chaudière process à haute pression est équipée de deux brûleurs pour fournir la quantité de chaleur nécessaire pour la production de la vapeur.

L'alimentation de gaz pour les deux brûleurs est assurée à travers un ballon mélangeur qui mélange le fuel gaz (gaz de process) et le gaz naturel.

L'air nécessaire à la combustion est fourni par un ventilateur à tirage forcé. L'allumage des deux brûleurs se fait par deux pilotes alimentés seulement par le gaz de combustion, l'alimentation d'air est faite par le ventilateur d'allumage.



**Figure IV.18 :** Description d'une chaudière process vapeur à haute pression

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 IV.19 et figure IV.20 :

### IV.8 Circulation de l'eau dans les chaudières

Après son préchauffage éventuel dans l'économiseur, l'eau débitée par la pompe alimentaire est admise dans le ballon supérieur.

La circulation de l'eau dans la zone de vaporisation est le plus souvent naturelle dans le cas des chaudières industrielles dont la pression est inférieure à 190bar. Pour des pressions supérieures, la circulation est assurée par une pompe qui en impose le débit.

Dans le cas de la circulation naturelle, le ballon supérieur constitue le point de départ de la circulation de l'eau.

L'eau liquide du ballon supérieur est dirigée vers le ballon inférieur dans des canalisations non chauffées (colonnes d'alimentation extérieures) ou les moins chauffées de la chaudière (tubes de descente localisés en fin de trajet des fumées). Du ballon inférieur, l'eau liquide est distribuée dans les différents faisceaux de vaporisation lui permettant de remonter vers le ballon supérieur. Sous l'effet de l'apport de chaleur, l'eau se vaporise partiellement dans ces faisceaux et remonte sous la forme d'une émulsion eau-vapeur de plus en plus chargée en vapeur au fur et à mesure de l'absorption de chaleur.

La différence des masses volumiques entre l'eau liquide et l'émulsion conduit sur l'ensemble de la hauteur de la chaudière à la création d'une charge motrice permettant la circulation naturelle de l'eau. Cette charge motrice est consommée en pertes de charge par le débit d'eau en circulation.

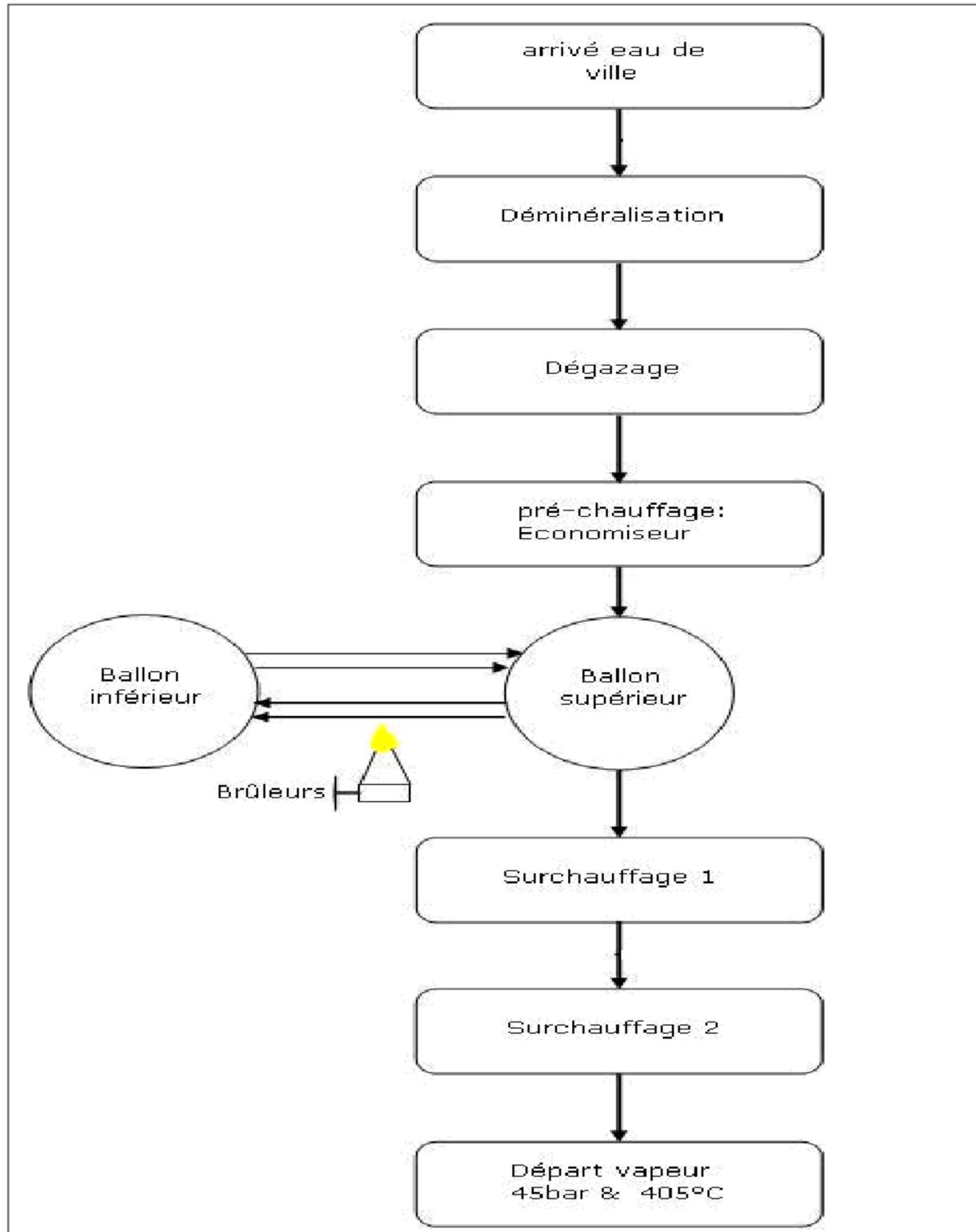
La séparation des phases liquide et vapeur est réalisée dans le ballon supérieur, ce qui se traduit par une interface dans ce ballon. La séparation naturelle sous l'effet de la différence de masse volumique des deux phases est favorisée par l'emploi de dispositifs comme les cyclones et sécheurs.

La vapeur saturée sèche est ensuite admise au surchauffeur placé dans le circuit des fumées à la sortie de la chambre de combustion. Selon l'allure de chauffe, la nature du combustible ou l'excès d'air de combustion, les conditions de l'échange de chaleur entre les fumées et la vapeur conduisent, en l'absence de réglage, à une température variable de la vapeur surchauffée.

Le contrôle de la température de vapeur surchauffée s'effectue dans les chaudières industrielles par désurchauffe par injection d'eau ou par surface d'échange.

Dans le cas de la désurchauffe par injection d'eau, celle-ci est réalisée dans le désurchauffeur qui se trouve de ce fait divisé en deux parties : surchauffeur primaire en amont de la désurchauffe et surchauffeur secondaire en aval. L'intérêt de cette disposition est de garantir que la vaporisation de l'eau injectée est complète avant la mise sur le réseau de la vapeur.

La désurchauffe par surface consiste à refroidir la vapeur dans un échangeur auxiliaire qui peut être indépendant ou intégré dans la chaudière. Le plus souvent, les tubes dans lesquels circule la vapeur baignent dans l'eau du ballon inférieur.



**Figure IV.19 : Circuit Eau/Vapeur**

Suivant le type de la circulation d'eau on distingue :

**- Chaudières à circulation d'eau naturelle :**

L'eau descend par gravité du ballon supérieur au ballon inférieur par les tubes de chute, puis remonte sous forme liquide-vapeur au ballon supérieur à travers les tubes vaporisateurs.

**- Chaudières à circulation d'eau forcée :**

La circulation d'eau se fait grâce à des pompes intégrées dans le circuit.

Suivant le timbre :

- BP (Basse Pression) timbre jusqu'à 15 bars

- MP (Moyenne Pression) timbre entre 15 et 30 bars
- HP (Haute Pression) timbre supérieur à 30 bars.

### IV.9 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 Oil (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 IV.20 schématise ce circuit :

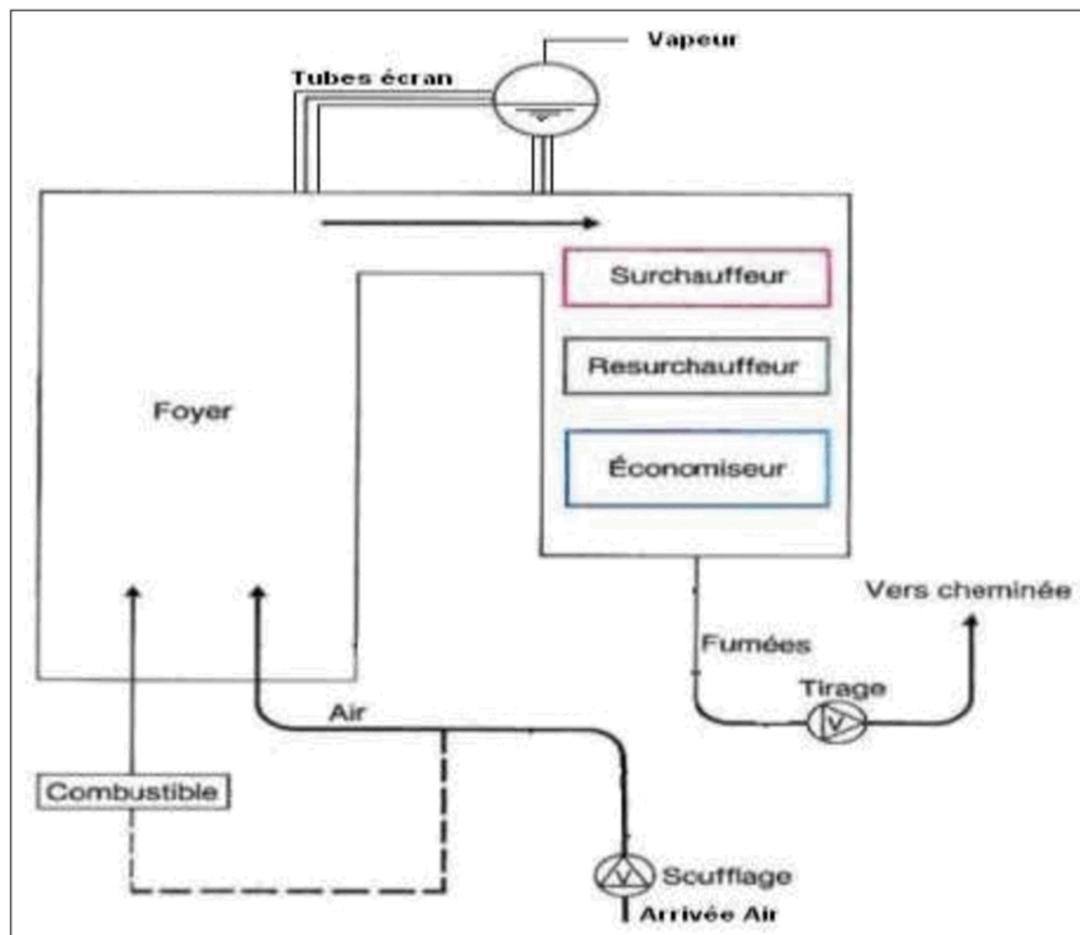


Figure IV.20 : Circuit Air/Fumée

### IV.10 Les modes de transfert de chaleur dans une chaudière

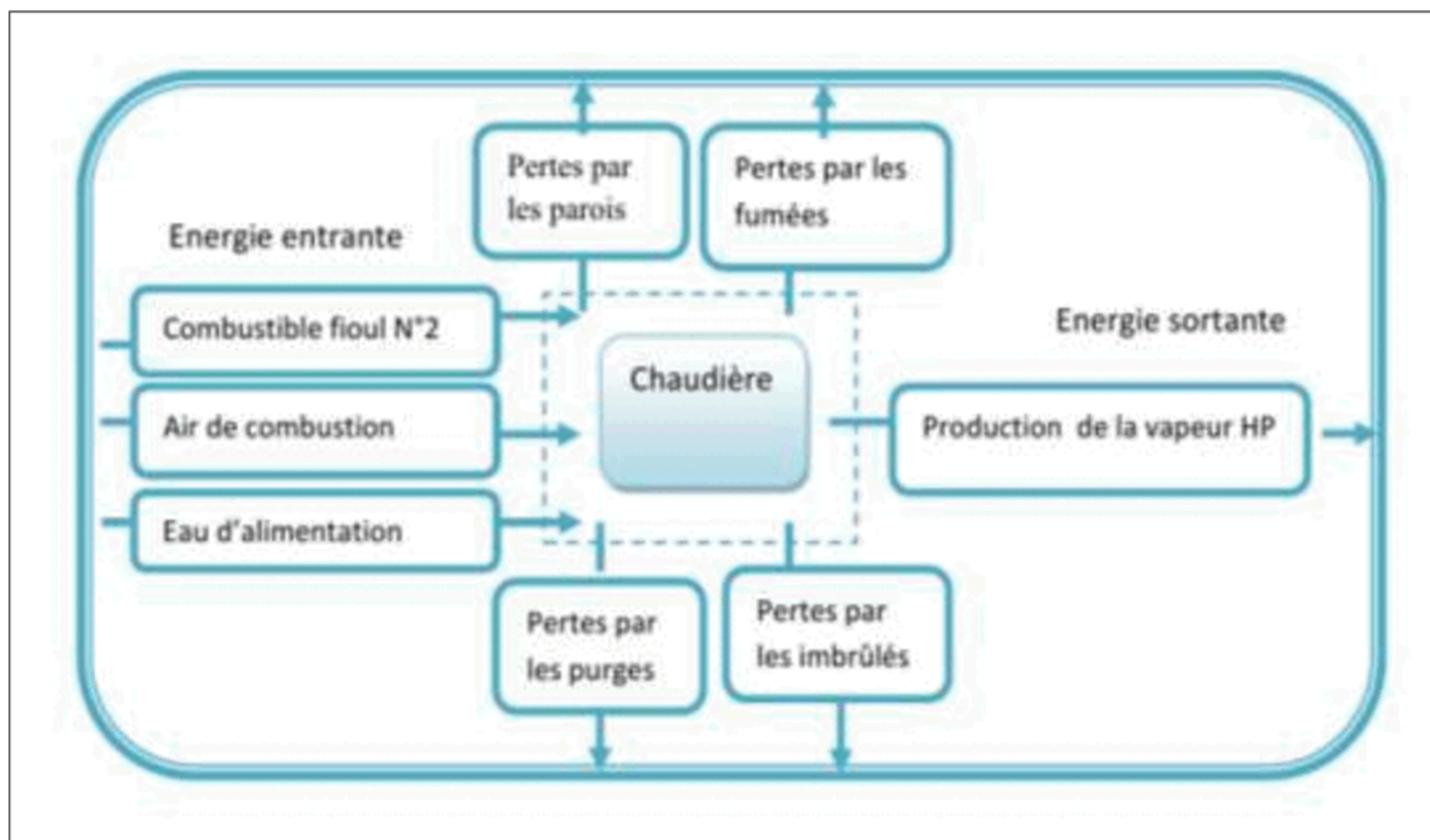
On retrouve les trois modes de transfert de chaleur dans une chaudière.

Les produits de la combustion cèdent leur chaleur aux tubes par radiation et par convection. A travers les parois des tubes, le transfert se fait par conduction. A l'intérieur des tubes, c'est la convection qui intervient à nouveau.

### IV.11 Calcul thermique d'une chaudière

#### IV.11.1 Bilan d'énergie d'une chaudière

Généralement la chaleur produite par combustion n'est jamais totalement transférée ou récupérée par le fluide qu'on désire chauffer, car il existe toujours des pertes dues aux différents facteurs. Plusieurs paramètres influencent la valeur de rendement, dont la température et la pression d'entrée de l'eau, du comburant et du fuel, la nature de l'eau entrante, le niveau de l'eau dans la chaudière.



**Figure IV.21 : Bilan d'énergie d'une chaudière**

Dans notre cas le bilan se réduit à :

**Energie entrante = Energie sortante**

**Puissance fournie = Puissance utile + Pertes**

#### Evaluation des pertes

Les différentes pertes évaluées :

- ✓ Pertes par les fumées.
- ✓ Pertes par les imbrûlés.
- ✓ Pertes par les purges.
- ✓ Pertes par les parois.

**Energie entrante** = combustible + air préchauffé + eau préchauffée

**Energie sortante** = vapeur + pertes par les fumées + pertes par parois + pertes par imbrulés + pertes par les purges.

### IV.11.2 Calcul du rendement d'une chaudière

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

#### IV.11.2.1 Première méthode (méthode directe)

Le rendement d'une chaudière est le rapport entre l'énergie produite utile et l'énergie totale introduite. Il est exprimé par la relation suivante :

$$\eta (\%) = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie introduite}} \times 100 \quad (\text{IV. 1})$$

La puissance utile est calculée par la formule :

$$Q_U = \sum D_s h_s - \sum D_i h_i \quad (\text{IV. 2})$$

Avec :

$h_i$  : enthalpie de l'eau entrante (KJ/Kg) ;

$h_s$  : enthalpie de la vapeur sortante (KJ/Kg) ;

$D_i$  : débit de l'eau entrante (Kg/s) ;

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

#### IV.11.2.1.1 Les puissances introduites dans la chaudière

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

##### *IV.11.2.1.1.a Puissance introduite sous forme d'Enthalpie de formation du combustible*

Il s'agit du pouvoir calorifique inférieur du fioul lourd, pour obtenir la puissance, il suffit de multiplier par le débit de combustible.

Cette puissance est exprimée par :

$$Q_1 = \text{PCI} \times D_{\text{fioul}} \quad (\text{IV. 3})$$

Avec :

$D_{fioul}$  : le débit de combustible.

### ***IV.11.2.1.1.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.

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 :

$$Q_{fioul} = Q_2 = D_{fioul} C_{pm} (T_{af} - T_r) \quad IV.4)$$

Avec :

$D_{fioul}$  : débit de fioul (Kg/h) ;

$C_{pm}$  : chaleur spécifique moyenne du fioul à pression constante (Kcal/ Kg. K) ;

$T_{af}$  : Température d'admission du fioul

$T_r$  : Température de référence.

### **IV.11.2.1.1.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 de 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 :

$$Q_a = Q_3 = D_a C_{pa} (T_{aa} - T_r) \quad (IV.5)$$

Avec :

$D_a$  : débit d'air (Kg/h) ;

$C_{pa}$  : chaleur spécifique moyenne de l'air à pression constante et à une température moyenne (Kcal/ Kg.K) ;

$T_{aa}$  : température d'aspiration de l'air (°C) ;

$T_r$  : Température de référence (°C).

### IV.11.2.1.2 La puissance globale introduite dans les chaudières

On a :

$$Q_{in} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (IV.6)$$

Tel que :

$Q_1 = D_{fioul} PCI_{fioul}$  : Puissance provenant de l'enthalpie de formation du combustible.

$Q_2 = Q_{fioul} = D_{fioul} C_{pfioul} (T_{fioul} - T_r)$  : Puissance introduite sous forme d'enthalpie sensible du fioul.

$Q_3 = D_a C_{pair} (T_{aa} - T_r)$  : Puissance apportée par l'air.

### IV.11.2.2 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.

#### IV.11.2.2.1 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 CO<sub>2</sub> (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 %CO<sub>2</sub> 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 :

$$\text{Pertes} = K \times (T_f - T_a) / (\%CO_2) \quad (IV.7)$$

Avec

$T_f$  : température des fumées

$T_a$  : température de l'air ambiant

%CO<sub>2</sub> : teneur en CO<sub>2</sub> des fumées (en %).

$K$  : est le coefficient de Siergert varie avec le combustible.

Il est déterminé par la formule :

$$K = 0.008 \times \%CO_{2max} + 0.48 \quad (IV.8)$$

### IV.11.2.2.2 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 :

$$Q_p = P' \times C \times \frac{P_M}{P} \quad (IV.9)$$

Avec

$C$  : Coefficient d'écran ( $C = 0.75$ )

$P'$  : Valeur de la perte par parois, exprimée en pourcentage du PCI du fioul consommé ( $0.59 < P' < 0.6$ ) ;

$P_M$  : Puissance maximale de la chaudière ;

$P$  : Puissance de la chaudière lors de l'essai.

### IV.11.2.2.3 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 :

$$\eta_c = 100 - \text{Pertes fumées (en \%PCI)} \quad (IV.10)$$

### IV.11.2.2.4 Rendement global

Le rendement global est exprimé comme suit :

$$R = 100 - \frac{\text{Pertes}}{\text{Energie introduite}} = 100 - \left(\frac{\pi}{Q_{in}}\right) \quad (IV.11)$$

Pertes globales :  $\pi = Q_f + Q_p$

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

### IV.12 Principaux paramètres à surveiller lors de l'exploitation d'une chaudière

1. Niveau d'eau dans le ballon
2. Débit d'eau d'alimentation
3. Débit de vapeur
4. Débit d'air / O<sub>2</sub>% dans les fumées
5. Les analyses des eaux de chaudière
6. La température des gaz de combustion
7. Excès d'air
8. Surfaces d'échange encrassés (50% pertes par gaz combustion et 2% en perte combustible)
9. Température de l'eau d'alimentation
10. Pertes par rayonnement
11. Température de l'air de combustion
12. Nature du combustible
13. Pression du brûleur à gaz
14. Pression dans le foyer
15. Pression dans le ballon

## *Références Bibliographique*

- ✓ TOTAL, Rappel de théorie, Les grandeurs physiques, Cours EXP-PR-RT040, Support de formation, Révision 0.2.
- ✓ M Thierry Chassain ; « La Combustion », Université Paul Sabatier de Toulouse.
- ✓ Dominique INGRAIN, Pouvoir Calorifique des gaz, Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle, R 2 980 – 1.
- ✓ Irvin Glassman, Combustion, Second edition, Academic Press, INC, 1987.
- ✓ Répercussions de la combustion sur l'environnement ;  
<https://www.rncan.gc.ca/energie/publications/efficacite/industrie/peeic/6696>.
- ✓ Georges Monnot ; « La Combustion dans les fours et les chaudières », Editions TECHNIP, 1978.
- ✓ Cours de combustion 2<sup>ième</sup> partie, Combustions réelles, combustibles complexes, Christian Guilié Novembre 2006.
- ✓ Mr. Ben slimane Med Ilyas, Cours Fours Industriels, IAP Juillet / 2020 SONATRACH.
- ✓ TOTAL, Équipement Réchauffeurs et Fours, Manuel de formation : COURS EXP-PR-EQ110-FR, Révision 0.1, Exploration et production, Dernière révision : 08/06/2007.
- ✓ Benfedda, M. Beauchemin, F. Ferrani, M. Amir ; « Fours et Chaudières », Institut des Procédés Industriels Du collège de Maisonneuve, Technique des Procédés Chimiques, No du cours : 210-316-MA.

- ✓ Formation Industrie, Ingénieurs en Sécurité Industrielle, ENSPM 2000 - IFP Training, Rôle, « Description et Principaux Types de Fours et des Chaudières », D<sub>2-2/A</sub> , D<sub>2-2/B</sub>
  
- ✓ Jean Parisot, « Conception et calcul des chaudières : généralités et bilans », Techniques de l'ingénieur B 1 460, 1993.
  
- ✓ Référentiels, normes et guides de bonnes pratiques pour l'exploitation des chaudières industrielles au gaz, DRA 71, INERIS.