

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Larbi Ben M'Hidi Oum El Bouaghi

Faculté des Sciences et Science Appliquées

Département de Génie des Procédés

Support de Cours

Matière : Fours et chaudière

Pour les étudiants de Première Année Master 'Génie Chimique'

Filières : Génie Chimique

Dr. Amar HADEF

Sommaire

Chapitre

Page

Chapitre 1. INTRODUCTION

01

Chapitre 2. .COMBUSTIBLES ET ENERGIE DE COMBUSTION

Les combustibles ; La combustion. ; Réaction de combustion ; Qualité de la combustion. ;

03

Les équipements de combustion ; Aspects environnementaux liés à la combustion.

Chapitre 3. LES FOURS INDUSTRIELS

14

3.1. Classification et description des fours industriels.

Fours continus, fours discontinus, chauffage direct et chauffage indirect, Fours à haute et à basse température, dimensionnement d'un four.

3.2. Bilan énergétique d'un four.

3.3. Rendement d'un four.

3.4. Exploitation des fours industriels (principales opérations) :

Chapitre 4. LES CHAUDIERES INDUSTRIELLES

25

4.1. Rôle des chaudières industrielles.

4.2. Aspect thermodynamique des chaudières.

4.3. Différents types de chaudières

Chaudières à tubes d'eau, Chaudières à tubes de fumées, Chaudières de récupération.

4.4. Circulation de l'eau dans les chaudières.

4.5. Calcul thermique d'une chaudière.

4.6. Principaux paramètres à surveiller lors de l'exploitation d'une chaudière.

Chapitre 1. INTRODUCTION

Les économies de l'énergie s'imposent avec une exigence croissante. Or, dans l'industrie, ce sont les générateurs de vapeurs qui consomment le plus d'énergie, soit pour produire l'énergie thermique sous forme de vapeur, soit pour produire de l'énergie électrique dans les centrales. Parmi les moyens qui permettent d'assurer le meilleur rendement des chaudières et tous les accessoires, la régulation automatique figure en bonne place ; elle permet d'assurer le maintien à leur valeur optimale des caractéristiques de fonctionnement tout en évitant les à-coups si préjudiciables à la tenue du matériel.

La thermodynamique joue un rôle important dans l'analyse des systèmes et dispositifs dans lesquels le transfert et la transformation d'énergie ont lieu. Les implications de la thermodynamique sont lointaines et son application couvre tout le domaine de l'entreprise humaine. tout au long de l'histoire technologique , le développement de la science a amélioré notre capacité à exploiter l'énergie et à l'utiliser pour les besoins de la société.

La révolution industrielle est le résultat de la découverte de la façon d'exploiter l'énergie et de convertir le travail en chaleur. L'expérience montre la possibilité de la conversion complète du travail en chaleur, mais la chaleur est taxée lorsqu'elle est convertie en travail dans un moteur cyclique. Pour cette raison, le retour sur notre investissement de transfert de chaleur est comparé au transfert de travail de sortie et des tentatives sont faites pour maximiser ce retour. Les problèmes posés par le vecteur énergétique se réduisent aux problèmes de la maîtrise des systèmes de transfert ou de conversion de cette énergie telles que les chambre de combustion les turbines les chaudières à vapeur etc... Pour optimiser l'exploitation des différents types d'énergie il est indispensable de savoir et comprendre le fonctionnement optimal de chaque élément des installations thermiques.

La rédaction de ce manuel est réalisée dans ce contexte pour dévoiler aux lecteurs les principes et les caractéristiques d'exploitations des installations énergétiques.

ce manuel est principalement destiné à être utilisé dans les cours d'ingénierie de premier cycle et de niveau supérieur par conséquent, au fur et à mesure que l'étudiant acquiert une compréhension suffisante du sujet, l'importance du fondamental devient évidente, et les principes sous-jacents de la thermodynamique dévoilent leur logique et leur simplicité.

Chapitre 2. COMBUSTIBLES ET ENERGIE DE COMBUSTION

2.1 Les combustibles

On appelle combustibles, les substances dont la combustion permet de fournir une quantité d'énergie thermiques. L'énergie chimique contenue dans le combustible est destinée à être convertie en énergie thermique. En présence de l'air, les combustibles sont utilisés dans le fonctionnement des brûleurs, moteurs thermique, fours ou chaudières pour fournir de l'énergie thermique, qui est utilisée dans le secteur domestique et industriel .

Suivant leur état physique, les combustibles se répartissent en deux types :

- Les combustibles solides (charbon, bois) ;
- Les combustibles liquides (GPL, FOD, fioul lourd et produits assimilés);

Les combustibles sont obtenus par la voie la plus courante, qui est le raffinage du pétrole (l'ensemble des opérations qui transforment le pétrole brut extrait du gisement en produits utilisables) comme :

❖ *Le gaz naturel*

Le gaz naturel est une source d'énergie fossile, qui représente le cinquième de la consommation énergétique mondiale. En raison de ses avantages économiques, le gaz naturel devient chaque jour plus attractif pour beaucoup de pays. Relativement à ces propriétés, processus de combustion le caractérisant, en font l'une des sources d'énergie les plus utilisés à ce jour. Actuellement, il représente la deuxième source d'énergie la plus utilisée après le pétrole, suivant le département américain de l'énergie, sa production énergétique mondiale atteint 23% en 1999. Le gaz naturel est un mélange d'hydrocarbures légers contient du méthane (CH_4), de l'éthane (C_2H_6), du propane(C_3H_8), des butanes et des pentanes. D'autres éléments tels que le CO_2 , l'hélium, le sulfure d'hydrogène et l'azote peuvent également être présent dans la composition. Cette dernière n'est jamais la même. Cependant, on peut dire que son élément principal est le méthane (environ 83%). Il est considéré comme un combustible propre. Sous

sa forme commerciale, il ne contient presque pas de soufre et ne produit pratiquement aucun dioxyde de soufre (SO₂). Ses émissions d'oxydes d'azote (NO_x) sont plus faibles que celles du pétrole ou du charbon et celles de gaz carbonique (CO₂) inférieures à celles des autres combustibles fossiles (selon Eurogas de 40 à 50% de moins que le charbon et de 25 à 30% de moins que le pétrole).

❖ ***Gaz du pétrole liquéfiés (GPL)***

L'appellation « Gaz de Pétrole Liquéfiés » ou « GPL » peut qualifier deux gaz à l'état liquide : le propane (C₃H₈) et le butane (C₄H₁₀). Ce sont tous les deux des hydrocarbures « saturés » qui sont composés de liaisons simples d'atomes de carbone et d'hydrogène. Ils présentent l'intérêt de se liquéfier sous une pression moins forte que les autres gaz (notamment le méthane) : entre 1,5 et 7 bar.

❖ ***Gaz Naturel liquéfié (GNL)***

Le Gaz Naturel Liquéfié (GNL) est un gaz naturel liquide par refroidissement à -160° C. Il est transporté à l'état liquide et à la pression atmosphérique. IL est constitué principalement de méthane à près de 90 %, ainsi que d'éthane, de propane et de moins de 1 % d'azote. La contraction de volume résultant de la liquéfaction du gaz naturel permet de transporter plus économiquement l'énergie, par navires (méthaniers), jusqu'à des sites de réception(terminaux méthaniers). Par un processus de chauffage dans les terminaux près des zones de consommation, le GNL est rendu à l'état gazeux et sera injecté dans le réseau de transport de gaz naturel. La chaîne gaz naturel liquéfié comprend trois maillons essentiels : l'usine de liquéfaction, le transport par méthaniers et le terminal de regazéification.

❖ ***Fuel-Oil domestique (FOD)***

Le fioul domestique (FOD) est issu du raffinage du pétrole, sa température d'ébullition est comprise entre 300 °C et 400 °C. Il est composé d'un mélange d'hydrocarbures, d'additifs et de

colorants. Le fioul domestique est défini comme un « mélange d'hydrocarbures d'origine minérale ou de synthèse, et éventuellement d'ester méthylique d'acide gras, destiné notamment à la production de chaleur dans les installations de combustion et sous certaines conditions d'emploi à l'alimentation des moteurs à combustion interne.

2.2 La combustion

La combustion est un processus d'approche à l'équilibre thermodynamique d'un mélange gazeux, constitué essentiellement d'un combustible fuel (carburant,) et d'un comburant (Oxygène) et d'espèces inertes dont la composition initiale est figée dans un état de non-équilibre physico-chimique. Cet état initial, peut en principe, être un état stationnaire mais dans l'échelle de temps caractéristique de l'évolution naturelle est de plusieurs ordre de grandeur supérieure à l'échelle de temps expérimentale.

Du point de vue cinétique, la combustion peut se présenter suivant deux modes : lente et vive, la première s'effectue quelque soit la composition du combustible-carburant, même à température ambiante.

Par contre la combustion vive se manifeste par la création d'une flamme, et ne peut s'observer que si d'une part les proportions respectives du combustible et du comburant sont comprises dans les limites d'inflammabilité. Energétiquement la combustion est le résultat d'une réaction chimique exothermique :



Le processus transforme les espèces réactives fuel et oxygène en produits brûlés avec une vitesse de réaction qui est fortement croissante de la température ; qui est définie comme étant la température atteinte par les gaz brûlés lorsque toute l'énergie chimique libérée n'a servi qu'à chauffer le mélange, dans ce cas, elle a pour expression :

$$T_{ad} = \frac{C_p(T_o)}{C_p(T_{ad})} T_o + \frac{Y_F \cdot Q}{C_p(T_{ad})} \quad (2.1)$$

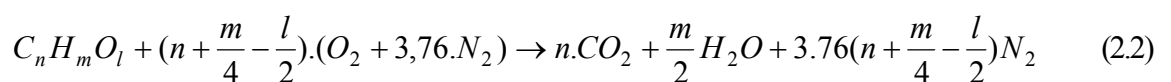
- Avec : $C_p(T_o)$ Chaleur massique du mélange à T_o .
 $C_p(T_{ad})$ Chaleur massique du mélange à T_o .
 Y_F Fraction massique du fuel dans le mélange initial.
 Q Chaleur massique de réaction dégagée

On reproche à cette formule qu'elle est déduite d'une réaction supposée globale, qui est un peu loin de la réalité. Puisqu'il y aura des réactions élémentaires intermédiaires exothermiques ou endothermiques.

2.3 Réaction de combustion

2.3.1 Combustion stœchiométrique

La combustion stœchiométrique est la combustion qui caractérise chaque mélange chimique. Elle est la proportion suivant laquelle le corps se combine entre eux. La stœchiométrie permet d'établir les bilans réactionnels est exprime l'aspect quantitatif fondamental des réactions chimiques. On la qualifie d'une combustion complète puisqu'elle conduit aux produits finaux CO_2 ; H_2O et N_2 (sans excès d'air). Une telle réaction peut être écrite sous la forme :



2.3.2 Combustion réelle.

Dans la réalité, il est impossible d'obtenir un mélange parfait et uniforme de composition. Pour éviter la combustion incomplète, on introduit un excès d'air et le mélange sera alors défini par un nouveau paramètre α appelé coefficient d'excès d'air :

$$\alpha = \frac{\left[\frac{V_{air}}{V_{comb}} \right]_{réel}}{\left[\frac{V_{air}}{V_{comb}} \right]_{stochio}} \quad (2.3)$$

V : désigne le volume.

Son inverse, appelé richesse est noté :

$$F = \frac{1}{\alpha} \quad (2.4)$$

Un mélange est dit pauvre si $F < 1$ ($\alpha > 1$) et les produit de combustion seront CO_2 , H_2O , O_2 et N_2 .

Un mélange est dit riche si $F > 1$ ($\alpha < 1$) et les produit de combustion seront CO_2 , H_2O , O_2 , CO , et N_2 .

2.3.3 Réactions élémentaires

La réaction globale de la combustion (1.2) n'exprime en fait qu'un bilan de masse et d'énergie mais ne reflète nullement le mécanisme réel de processus de transformation. Le méthane par exemple se décompose initialement sous la forme $CH_4 \rightarrow CH_3 + H(+M)$. La réaction globale n'est donc qu'une succession de réaction plus simple appelées étapes élémentaires ; qui ne mettent en jeu simultanément que deux ou au plus trois partenaires appelées espèces intermédiaires. Dans le cas de la combustion, ces derniers peuvent être des molécules ou des radicaux libres lesquels jouent un rôle primordial. $CH_3 + O = CH_2O + H$,
 $CH_3 + OH = CH_2O + H_2$

2.3.4 Limite d'existence d'une combustion

A température ambiante un mélange de combustible et d'air ne donne en général lieu à aucune réaction chimique. Les réactions élémentaires ne sont possibles que si les espèces chimiques interviennent dans une structure plus riche en énergie, que leur structure normale, c'est

ce qu'on appelle état actif. Ce dernier peut être obtenu, soit par activation thermique, ou par activation catalytique ou par radiation.

L'explication de l'existence de ces limites intrinsèques n'est pas une chose facile. Mais on attribue cette contrainte à deux conditions l'une cinétique et l'autre thermique qui se conjuguent pour fixer dans ce domaine, la concentration des radicaux libres à une valeur critique définie par la compétition entre les réactions de ramification et de rupture de ces réactions.

2.3.5 Aspect thermodynamique de la combustion

La chaleur de combustion ou enthalpie de réaction est la chaleur libérée lors de la transformation de produits chimiques au cours d'une réaction chimique. Elle correspond à la variation de la quantité d'énergie lors de la conversion des réactifs en produits. Tandis qu'une réaction peut être exothermique (libération de chaleur) ou endothermique (absorption de chaleur), la plupart des réactions effectuées dans l'industrie sont exothermiques. Elle exprime la variation de l'énergie interne du mélange de masse m_v si on opère volume constant :

$$Q_v = \Delta U = \int_{T_f}^{T_o} m.C_v(T)dT \quad (2.5)$$

Où $C_v(T)$ est la capacité calorifique massique à volume constant du mélange. Par contre dans une réaction isobare, elle représente la variation de son enthalpie :

$$Q_p = \Delta U = \int_{T_f}^{T_o} m.C_p(T)dT \quad (2.6)$$

Avec $C_p(T)$ est la capacité calorifique massique à pression constant du mélange.

2.3.6 Aspect cinétique de la combustion

Du fait de la forte indépendance de la vitesse de réaction avec la température, cette vitesse est nulle ou tout au plus négligeable à la température ambiante, par contre, à la température de combustion ou température de flamme, cette vitesse devient très grande.

Dans les conditions habituelles, l'ordre de grandeur des échelles de temps caractéristiques de la réaction $\tau(T_o)$ est tel que $\tau(T_o)/\tau(T_{flamme}) > 10^{-10}$ avec $\tau(T_{flamme})$ proche à 10^{-5} s.

Considérant une réaction réversible entre n espèces élémentaires A_i avec deux constantes de réactions directe (K_d) et réciproque (K_r) schématisée par :



ν_i' : Coefficient stœchiométrique affecté à A_i (direct).

ν_i'' : Coefficient stœchiométrique affecté à A_i (réciproque).

L'existence d'un équilibre chimique définit que les corps formés sont capables de réagir partiellement l'un sur l'autre pour donner les produits initiaux.

Le taux de production ou de consommation de l'espèce A_i est :

$$\frac{dC_{A_i}}{\partial t} = (\nu_i'' - \nu_i') \cdot \left[K_d \prod_{i=1}^n C_{A_i}^{\nu_i'} - K_r \prod_{i=1}^n C_{A_i}^{\nu_i''} \right] \quad (2.8)$$

Où C_{A_i} désigne la concentration molaire de l'espèce A_i

Pour une telle situation, le taux de variation de l'espèce A_i est nul et on aura :

$$K_d \prod_{i=1}^n C_{A_i}^{\nu_i'} = K_r \prod_{i=1}^n C_{A_i}^{\nu_i''} \quad (2.9)$$

$$\frac{K_d}{K_r} = \frac{\prod_{i=1}^n C_{A_i}^{\nu_i''}}{\prod_{i=1}^n C_{A_i}^{\nu_i'}} = K_c \quad (2.10)$$

K_c désigne la constante d'équilibre rapportée aux concentrations.

De plus si on suppose que chaque espèce se comporte comme un gaz parfait obéissant à l'équation d'état :

$$P_i = C_{A_i} \cdot R.T \quad (2.11)$$

avec R= constante universelle des gaz parfait.

La relation (1.3) devient :

$$K_c = (R.T)^{\sum_{i=1}^n (v_i' - v_i'')} \cdot \frac{\prod_{i=1}^n P^{v_i''}}{\prod_{i=1}^n P^{v_i'}} = (R.T)^{\sum_{i=1}^n (v_i' - v_i'')} \cdot K_p \quad (2.12)$$

K_p désigne la constante d'équilibre rapportée aux pression partielles.

En exploitant la relation entre la pression partielle P_i de l'espèce A_i , la pression totale P et la fraction molaire x_i de l'espèce A_i :

$$P_i = x_i \cdot P \quad (2.13)$$

L'expression de K_p devient alors :

$$K_p = P^\beta \cdot \frac{\prod_{i=1}^n x_i^{v_i''}}{\prod_{i=1}^n x_i^{v_i'}} \quad (2.14)$$

$$\text{avec} \quad \beta = \sum_{i=1}^n v_i'' - \sum_{i=1}^n v_i' \quad (2.15)$$

2.4. Qualité de la combustion

La qualité de la combustion est caractérisée principalement par deux facteurs :

- Le rendement de la combustion, qui désigne la combustion totale du combustible (absence d'imbrûlés ou de composés incomplètement oxydés).
- Le niveau thermique atteint par les températures de flamme, déterminé par le rapport de la quantité de chaleur libérée par la combustion à la quantité des réactifs et des produits.

En pratique, c'est en jouant sur l'excès d'aire que l'on peut optimiser la combustion. Un grand excès d'air garantit qu'en tout point, suffisamment d'oxygène est disponible pour la combustion, et donc limite les risques d'imbrûlés. En revanche, il dilue les fumées, dont la température chute.

2.5. Les équipements de combustion

Les équipements standards sont prévus pour les combustibles gazeux ou les combustibles liquides, chacun à son brûleur qui est monté sur une chambre de combustion en acier inoxydable.

L'ensemble du brûleur pour combustibles gazeux est composé d'une soufflante, tableau de contrôle, une vanne, deux têtes interchangeable pour brûler des gaz naturels (méthane) ou des gaz type GPL. L'arrivée de gaz traverse un détendeur et un rotamètre. Le débit étant modulable à l'aide d'une vanne placée en aval. Le brûleur pour combustibles liquides inclue une soufflante, un boîtier de contrôle. L'atomisation s'opère par jet pressurisé entre 10 et 15 bars. Il existe deux gicleurs interchangeables fonctionnant de 7 à 12.5 bars avec un angle de pulvérisation de 60°.

Les gaz de combustion sont analysés grâce à la sonde de prélèvement de gaz (analyseurs de gaz standard, chromatographe). Les mesures de la quantité de chaleur évacuée par l'eau de refroidissement et de la température des gaz brûlés facilitent la détermination de l'influence des principaux paramètres qui contribuent à l'utilisation efficace des combustibles liquides et gazeux.

2.6. Aspects environnementaux liés à la combustion

Dans le secteur énergétique, les émissions de gaz à effet de serre résultent de la production, de la transformation de produits énergétiques. Ces deux paramètres sont principales liées à la combustion :

1- *Combustion stationnaire* (la production et la transformation d'énergie, notamment la génération d'électricité, le raffinage du pétrole, l'industrie manufacturières, qui comprennent des activités telles que l'agro-alimentaire, la sidérurgie, la production de métaux non-ferreux, la fabrication de produits chimiques, etc.)

2- *Combustion mobile*, liée aux transports (l'aviation civile, le transport routier).

Les émissions liées au processus de combustion utilisé, comprennent les émissions de CO₂, N₂O, d'oxydes d'azote (NO_x), de monoxyde de carbone (CO) et de composés organiques volatiles non-méthaniques (COVNM), qui est un composé principalement constitué d'atome de carbone et d'hydrogène. Il peut aussi contenir des atomes d'oxygène, d'azote, et de soufre.

❖ Emissions de CO₂

Les émissions de dioxyde de carbone produit par l'oxydation du carbone se présentent dans les combustibles lors de la combustion. Dans des conditions stœchiométriques, la teneur totale en carbone des combustibles serait convertie en CO₂. Or, les processus de combustion réels ne sont pas parfaits et donnent lieu à une présence de petites quantités de carbone partiellement oxydé et non oxydé.

❖ Emissions non CO₂

Dans une combustion riche, une petite proportion de carbone sont rejetées sous forme de CO, ou de COVNM, et finissant par s'oxyder en CO₂ dans l'atmosphère. De plus il y aura une production d'autres émissions tels que N₂O et de NO_x.

L'estimation de ces émissions est relative à la connaissance de plusieurs facteurs liés les uns aux autres, parmi lesquels les conditions de combustion, le régime de combustion, l'entretien, les dispositifs de contrôle des émissions.

L'oxyde nitreux (N₂O) Il est produit directement par la combustion ; il a été montré que les températures de combustion plus basses favorisent la présence de N₂O. Il est pourtant un puissant gaz à effet de serre... 25 fois plus « réchauffant » que le méthane et 300 fois plus le CO₂. Sa durée de vie dans l'atmosphère est également la plus longue des trois. Elle est de 120 ans en moyenne contre 100 ans pour le CO₂ et 12 ans pour le méthane.

Le monoxyde d'azote NO est le composé azoté toxique et polluant produit au cours des processus de combustion avec une quantité prépondérante. Trois catégories de mécanismes de formation de NO sont démontrées. Selon l'origine du di-azote une distinction est faite. Ainsi que, deux mécanismes mettent en jeu les atomes d'azote N provenant de l'azote de l'air : le mécanisme

du NO-thermique et le mécanisme du NO-précoce. Le troisième mécanisme se base sur l'azote pouvant être lié à la chaîne carbonée du combustible : le mécanisme du NO-combustible.

Chapitre 3. LES FOURS INDUSTRIELS

Les fours sont utilisés comme moyen d'élévation de température des produits. Ils se présentent comme:

- ❖ Installation destiné au chauffage (réchauffage de lingot d'acier avant la déformation, réchauffage de pétrole brut avant la distillation) ;
- ❖ Réacteur, par son biais on élabore les produits (Les ciments, la fusion de verre, le vapocraquage de la pétrochimie).

Ils se trouvent dans un grand nombre de secteurs industriels mais principalement dans l'industrie des métaux, des matériaux et des céramiques.

Selon leurs fonctions, les fours peuvent être classés suivant:

- Manutention du produit : four continu (appelés fours tunnels ou fours à passage), ou discontinu (appelés fours intermittents ou fours à charge)
- Procédé de chauffage : direct ou indirect.

3.1. Classification et description des fours industriels.

3.1.1 Fours continus

Les produits à traiter dans ce type de four, se déplacent d'une façon continue ou pas à pas depuis le point de départ (l'enfournement) jusqu'à la fin (défournement). Il fonctionne en régime thermique établi, relativement de l'avancement de la charge dans le four, le cycle de température est réalisé sur la longueur du four, où la température est constante dans le temps de chaque section du four pour un cycle de traitement donné.

Les différents fours continus sont :

- Fours à pousseuse (fours à rails intérieurs, fours à galets intérieurs) (figure 3.1);
- Fours à traction de feuillard (figure 3.2) ;
- Fours à sole inclinée ;
- Fours à sole vibrante ;
- Fours à tubes-moufles ;

- Fours à chaînes ;
- Fours à câbles transporteurs ;
- Fours à tablier sans fin ;
- Fours à rouleaux commandés ;

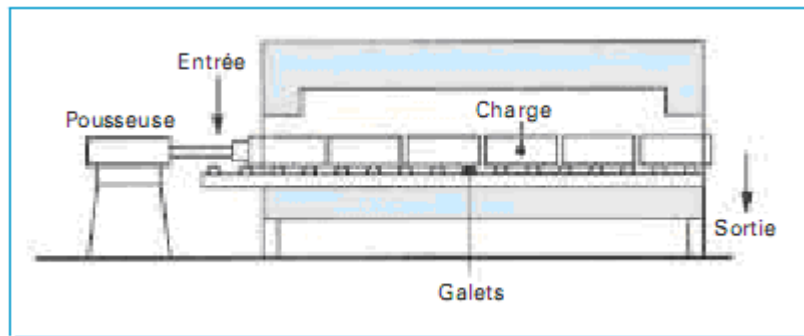


Figure 3.1. Fours à pousseuse

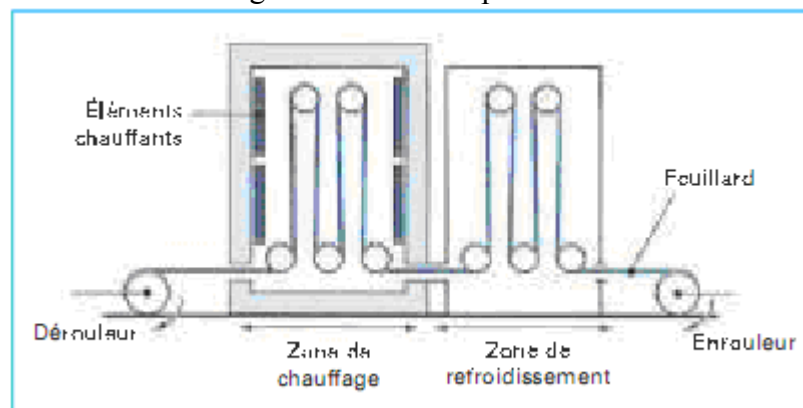


Figure 3.2. Fours à traction de feuillard

3.1.2 Fours discontinus (intermittents)

Dans ce type de four, la charge reste fixe durant le traitement entre point de départ (l'enfournement) jusqu'à la fin (défournement). Il est soumis à un cycle de température variable dans le temps, tout comme la charge, avec un fonctionnement en régime thermique variable où l'inertie thermique du four jouer un rôle important dans son exploitation. Les différents fours discontinus sont :

- Fours à sole horizontale fixe ;
- Fours puits ;

- Fours à creuset ;
- Fours à sole élévatrice (figure 3.3) ;
- Fours à cloche (figure 3.4) ;
- Fours à pots ;
- Fours basculants ;
- Fours à sole mobile (figure 3.3) ;
- Fours à chariots.

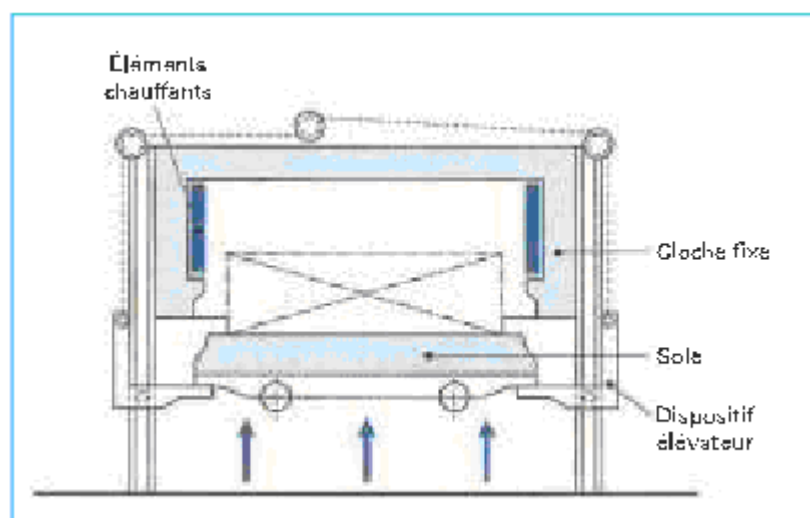


Figure 3.3 Les fours à sole élévatrice

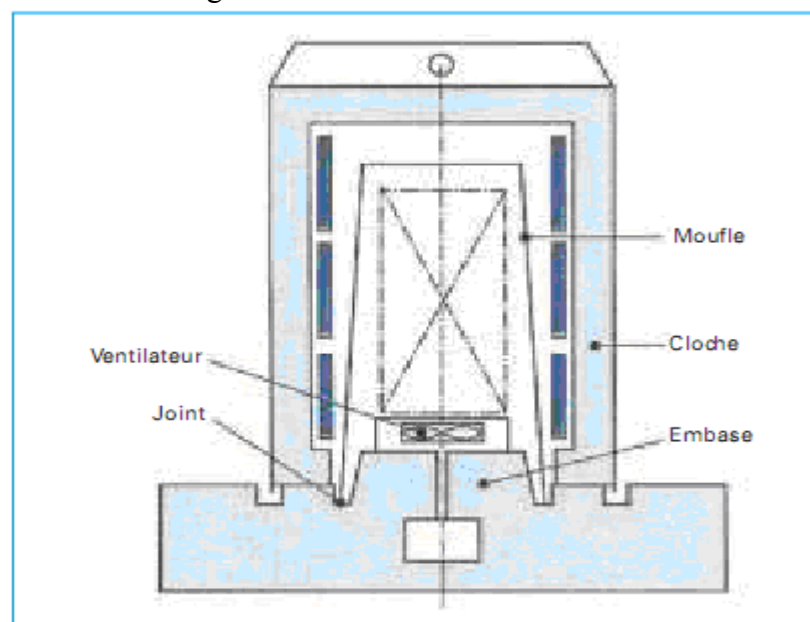


Figure 3.4. Les fours à cloche

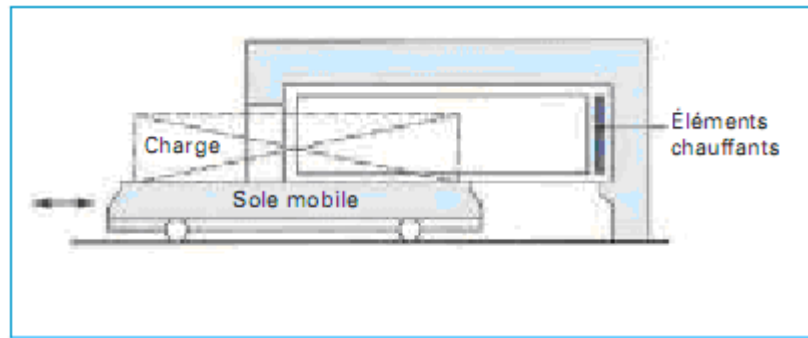


Figure 3.5. Les fours à sole mobile

3.1.3.a Chauffage direct

Les produits de combustion qui se trouvent sous forme des gaz et à une température élevée, sont en contact direct avec les produits à chauffer (figure 3.5). Parfois ce contact est indésirable, pour remédier ce problème, on place parfois, entre les produits et les gaz un écran protecteur.

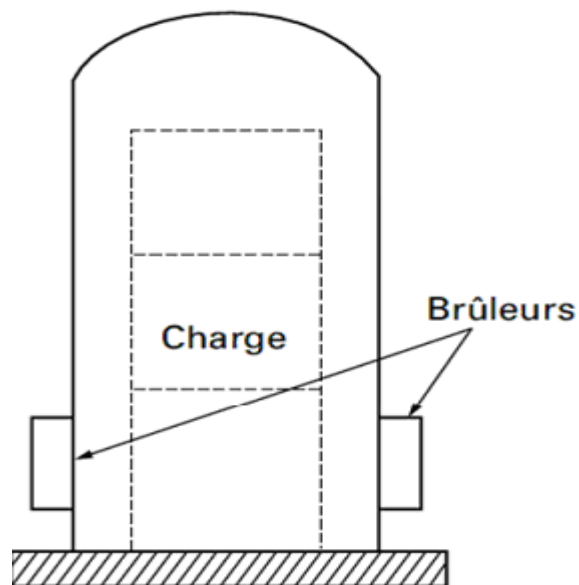


Figure 3.5. Four à chauffage direct.

3.1.3.b Chauffage indirect

Le chauffage indirect se produit lorsque le combustible de chauffage est brûlé à l'intérieur d'un tube radiant qui représente élément d'échange de chaleur. Les produits de combustion sont isolés de l'atmosphère du four. L'énergie libérée par cette combustion doit ensuite être transférée, typiquement par un mélange de convection et de rayonnement, de l'élément d'échange thermique

dans la chambre du four et le produit que le four traite. Bien que ce processus diminue l'efficacité globale du processus, il est nécessaire de contrôler l'atmosphère des fours pour garantir la qualité du produit.

3.1.4 Classification des fours suivant la température

Cette classification n'est pas évidente, puisqu'une température peut être considérée comme haute dans un domaine d'activité et basse dans un autre domaine.

Une température de 300°C sera considérée comme haute dans le raffinage physique (distillation et neutralisante) des huiles, et basse dans un traitement thermique des outils de coupe et dans l'industrie du verre.

Du point de vue thermique :

- au-dessus de 1000°C, le transfert de chaleur se fait pratiquement par rayonnement.
- au-dessous de 700°C, l'utilisation de la quantité de chaleur des gaz brûlés autour du produit est nécessaire pour améliorer le transfert de chaleur par convection.

3.1.4.a Fours à haute :

Ce sont les fours de sidérurgie, de verrerie, de cimenterie. Où la température que l'on veut obtenir sur le produit dépasse les 1200°C. Le mode de transfert de chaleur s'y fait pratiquement par rayonnement des gaz issus de la combustion, le transfert de chaleur par convection jouera dans ces fours un rôle secondaire pour ce qui concerne la quantité de chaleur transférée, mais aura, dans un certain nombre de cas, un impact non négligeable sur l'égalisation des températures.

3.1.4.b. Fours à basse température,

En particulier, ce sont les fours de traitement thermique de métallurgie, les fours de revêtement de surface et les fours pour les métaux non ferreux. La température que l'on veut obtenir sur la

charge ne dépasse rarement 700°C, et est parfois inférieure. Dans ce type de fours, le mode transfert de chaleur par convection, joue un rôle important

3.1.5 Dimensionnement d'un four

Le transfert de chaleur représente un maillon pour le fonctionnement d'un four, Les échanges thermiques se font suivant différents modes entre les trois éléments constitutifs du four :

- Echange gaz/paroi par convection et rayonnement,
- Echange gaz/solides par convection et rayonnement,
- Echange solides/paroi découverte par rayonnement,
- Echange solides/paroi couverte par conduction et rayonnement,
- Echange paroi extérieure/air ambiant par rayonnement et convection.

Donc le dimensionnement d'un four se base sur la résolution simultanément des équations des modes de transfert de chaleur qui sont :

3.1.5.a Transfert de chaleur par rayonnement :

Les échanges de chaleur par rayonnement entre le four et la charge sont décrits par la loi de Stefan-Boltzman qui est :

$$Q_r = a \cdot \sigma \cdot S (T_f^4 - T_c^4) \quad (3.1)$$

Q_r : Puissance thermique transmise du four à la charge [W]

σ : Constante de Stefan Boltzmann $5.67 \cdot 10^{-8}$ [W.m⁻².K⁻⁴]
 $4.89 \cdot 10^{-8}$ [Kcal.m⁻².h⁻¹.K⁻⁴]

S : Aire de la surface émettrice de rayonnement [m²].

T_f : Température de la surface émettrice du four [K].

T_c : Température de la surface réceptrice de la charge [K].

a : Coefficient d'absorption du rayonnement par la charge ($0 < a < 1$).

$a \approx 1$ dans le cas où les dimensions du four sont grandes par rapport à celle de la charge.

3.1.5.b Transfert de chaleur par convection

Les échanges de chaleur par convection dans le four, sont décrits par la loi de Newton qui est :

$$Q_c = k.S(T_f - T_c) \quad (3.2)$$

Q_c : Puissance thermique échangée par convection entre le four à la charge [W]

k : Coefficient d'échange thermique convectif [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

S : Surface de la charge au contact de l'atmosphère du four [m^2].

T_f : Température des gaz dans le four [K].

T_c : Température de surface de la charge [K].

3.1.5.c Transfert de chaleur par conduction

La loi de Fourier décrit le mode d'échange de chaleur par conduction à l'intérieur du produit (charge) suivant la formule :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho.C_p} (\nabla T) \quad (3.3)$$

T : Température en un point du solide,

λ : Coefficient de conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$),

ρ : Masse volumique du solide (Kg.m^{-3}),

C_p : Capacité thermique du solide ($\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$),

t : Temps (s).

Actuellement, la résolution de ses équations qui régit les différents types d'échange de chaleur en deux dimensions ou trois, sont résolus numériquement avec des solveurs très développés, qui prend en considération les données suivantes :

- ❖ Flux thermiques ;
- ❖ Temps de résidence du produit nécessaire à l'égalisation des températures ;
- ❖ Chaleur utile ;
- ❖ Rendement de combustion ;
- ❖ Pertes de chaleur diverses ;

A la fin du calcul on déduit le temps de séjour du produit dans le four et les dimensions du four, en fonction de la production.

3.2. Bilan énergétique d'un four.

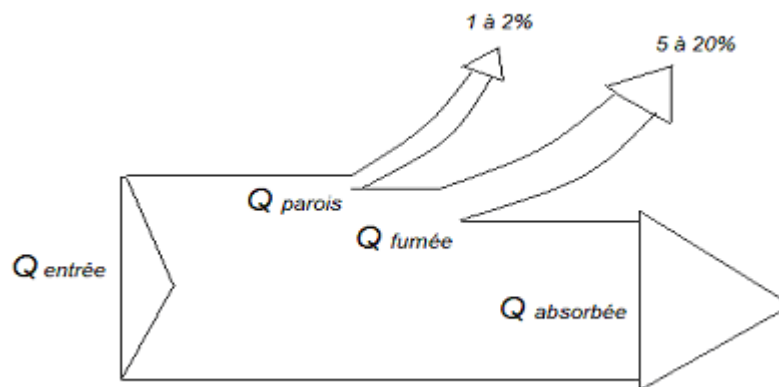


Figure 3.6. Diagramme de SNAKE

Selon le diagramme de SNAKE (figure 3.6), le bilan thermique du four s'exprime :

$$Q_{entrées} = Q_{absorbée} + Q_{fumées} + Q_{parois} \quad (3.4)$$

Avec les différentes pertes thermiques qui sont essentiellement :

- Les pertes par les parois du four (Q_{parois}), qui représentent 1 à 2% de chaleur libérée aux brûleurs.
- Les pertes par les fumées qui évacuent à l'atmosphère ($Q_{fumées}$), qui sont en général entre 5 et 20%.

3.3. Rendement d'un four.

Le rendement d'un four représente le rapport de l'énergie utile $Q_{absorbée}$ à l'énergie qu'il faut fournir au four $Q_{entrées}$.

Rappelant que $Q_{pertés}$ représente les diverses pertes thermiques, on déduit :

$$Q = Q_{absorbée} + Q_{pertés} \quad (3.5)$$

Or

$$\eta = \frac{Q_{absorbée}}{Q_{totale}} = \frac{Q - Q_{pertés}}{Q_{totale}} \quad (3.6)$$

Le terme $Q_{pertés}$ comprend :

- les pertes par les fumées $Q_{fumées}$;
- les pertes par les parois Q_{parois} ;
- l'énergie nécessaire au réchauffage des parois $Q_{réch.par.}$;
- les pertes par les ouvertures des portes $Q_{ouvertures}$.

Pour calculer le rendement du four, Il faut déterminer ces pertes.

3.3.1 Les pertes par les fumées

Les pertes par les fumées s'écrivent :

$$Q_{fumées} = V_f \cdot C_{pf} \cdot T_f \quad (3.7)$$

T_f : la température de sortie des fumées [$^{\circ}\text{C}$],

V_f : le volume des fumées [$\text{Nm}^3\text{Kg}^{-1}$],

C_{pf} : la capacité thermique volumique moyenne à pression constante de 0°C à calorifique T_f .

3.3.2 Les pertes par les parois

Dans un régime thermique établi, la quantité de chaleur échangée par les parois est établie suivant la relation suivante :

$$Q_v = K.S.(T_i - T_e) \quad (3.8)$$

Avec

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i}} \quad (3.9)$$

e_i : épaisseur des parois [m],

λ_i : conductivité thermique des parois [W/m·K],

h_e : coefficient d'échange thermique des parois avec l'air ambiant [W·m⁻²·K⁻¹]

T_i : température de la paroi intérieur du four, [K]

T_e : température extérieur de l'air ambiant, [K]

S : surface de la paroi intérieur du four. [m²]

3.3.3 L'énergie nécessaire au réchauffage des parois

L'énergie nécessaire pour le réchauffage des parois $Q_{réch.par}$ est en fonction de température d'équilibre du four, ainsi que celle des caractéristiques physiques, à la température considérée, des matériaux composants ces parois. Pour chacun des composants des parois, on a :

$$Q_{réch.par} = M_i.C_i.(T_f - T_i) \quad (3.10)$$

M_i : masse du matériau des parois du four [Kg],

C_i : capacité thermique massique matériau des parois du four [J/Kg K],

T_i : températures initiales et finales matériau des parois du four [K].

3.4. Exploitation des fours industriels (principales opérations) :

3.4.1 Rendement en exploitation

Les conditions de fonctionnement du four sont variables durant son exploitation:

- ❖ L'utilisation du four est variable au cours de sa production maximale
- ❖ Un fonctionnement discontinu dans des périodes,

Ces deux points engendrent une consommation énergétique sensiblement supérieure à celle obtenue au cours d'un essai limité dans le temps. Pour cela, on utilise alors la notion de consommation spécifique C_s qui est le rapport de l'énergie totale utilisée durant un intervalle de temps donnée (par exemple un mois) à la masse de la charge chauffé durant la même période :

$$C_s = \frac{\text{Energie fourni par la combustion}}{\text{Masse de la charge}} \quad (3.11)$$

Plusieurs opérations principales définis l'exploitation des fours industriels : le préchauffage, le défournement, le enfournement, la régulation, etc.

3.4.2. Le préchauffage

Le réchauffage des fours avant l'introduction de la première charge est primordial. La durée de préchauffage dépendant de l'inertie thermique du four qui doit être connue pour bien programmer la production et la présence du personnel technique de conduite.

Dans le cas des arrêts de production de courte durée, le four doit être maintenu à une température donnée. Dans le cas des fours développés qui ont un système de contrôle-commande, le préchauffage et le maintien peuvent se faire en l'absence du personnel technique de conduite.

3.4.3. Enfournement, défournement.

Pour les fours discontinus, la charge à traiter est préparée durant la période de l'exécution du traitement de la charge précédente. La préparation peut être un dimensionnement, un contrôle de charge, un pesage, etc.

La durée de défournement et d'enfournement est prise en compte dans la production du four, pour déduire son âge de production.

3.4.4. Régulation de température

Afin d'assurer l'homogénéité par cycle, le four comporte plusieurs zones de régulation, qui comporte une boucle de régulation qui commande les équipements de chauffage affecté à cette zone. Chaque boucle de régulation est composée d'un (ou plusieurs) capteurs de température (pyromètre, thermomètre à infrarouge), et d'un système de modulation de puissance.

3.4.5. Conduite du four

Le contrôle en permanence de la température et éventuellement, les paramètres indicateurs, tels que les taux d'O₂, de CO et de CO₂, le point de rosée, le taux de consommation d'énergie (puissance électrique ou débit de combustible). Si des anomalies apparaissent, le personnel technique de conduite doit intervenir immédiatement pour y remédier, et de relever les anomalies dans un fiche technique de suivi de fabrication.

Chapitre 4. LES CHAUDIERES INDUSTRIELLES

Les geysers et les volcans sont des sources naturelles de vapeur figure 4.1. La vapeur d'eau est connue depuis l'utilisation du feu ou involontairement lors de l'extinction du feu avec de l'eau ou lors de la cuisson des aliments. Les premières réflexions sur l'utilisation technique de la vapeur sont attribuées à Archimède (287 – 212 avant JC) qui a conçu un canon à vapeur. Léonard de Vinci (1452 – 1519) a effectué des premiers calculs dans ce domaine et selon lesquels un boulet de 8 kilogrammes tiré par un canon de ce type tomberait à 1250 m environ. On attribue à Denis Papin la conception pratique de l'autoclave (vers 1680). Ce premier réservoir à pression a été déjà équipé d'une soupape de sécurité après l'explosion d'un prototype lors des premiers essais. L'utilisation de la machine à vapeur, à partir de 1770 environ, a rendu nécessaire d'étudier plus attentivement le fluide de travail vapeur d'eau d'un point de vue théorique et pratique. L'on compte parmi les praticiens James Watt et Carl-Gustav Patrik de Laval qui se sont tous deux enrichis en commercialisant leurs machines.



Figure. 4.1 : Les geysers et les volcans sont des sources naturelles de vapeur

4.1. Rôle des chaudières industrielles.

La chaudière est un équipement au cœur du système de chauffage central qui assure une production de chaleur fiable et efficace. Elle est définie scientifiquement par un Système

permettant d'augmenter la température d'un fluide caloporteur afin de transférer de l'énergie thermique.

Son rôle est double ;

- La génération de l'eau chaude et sa redistribution dans le réseau de chauffage (via les canalisations et les radiateurs) pour réchauffer la maison mais aussi produire de l'eau chaude sanitaire.
- La génération de la vapeur pour différents process industriels, notamment craquage de vapeur, distillation, décapage à la vapeur, pour la polymérisation et le chauffage de réacteurs.

Dans l'industrie productive (matériaux de construction, plastiques, médicaments, pneus ou papier), ce sont les installations de production de chaleur, les systèmes d'entraînement et de manutention, le chauffage et l'éclairage des locaux qui consomment le plus d'énergie. Par exemple :

- **L'industrie du papier :** l'eau chaude, vapeur et électricité pour les étapes de transformation et traitement ainsi que pour le chauffage des cylindres, pour le pressage, transport et séchage des bandes de papier sont réalisés grâce la chaudière figure 4.2.



Figure 4.2. Industrie de papier

- **Industrie pharmaceutique**

L'alimentation de générateurs de vapeur ultrapure et d'installations de distillation au moyen de chaudières conventionnelles à vapeur sont indispensables figure 4.3. La vapeur sert aussi au nettoyage, à la stérilisation et à la dépyrogénéation de conteneurs en verre ainsi qu'à l'humidification d'installations de climatisation.



Figure 4.3 : L'industrie pharmaceutique utilise la vapeur

- **Chimie**

Vapeur surchauffée pour le démarrage de turbines à vapeur (production d'électricité). Vapeur pour différents process, notamment craquage vapeur, distillation, stripping à la vapeur, pour la polymérisation et le chauffage de réacteurs



Figure 4.4 : Industrie pharmaceutique

- **Raffinerie**

Vapeur, électricité et eau chaude pour le chauffage des mélanges d'hydrocarbures dans les colonnes de séparation, préchauffage de pétrole brut, dans les étapes de distillation telles que la distillation fractionnée ainsi que pour le chauffage des systèmes de canalisation.



Figure 4.5. Raffinerie pleine de chaudière

La **chaudière est** tapissée de tubes dans lesquels circule de l'eau froide. En brûlant, le combustible dégage de la chaleur chauffant ainsi cette eau qui se transforme en vapeur, puis elle est envoyée sous pression vers les turbines.

Dans son acception moderne, elle désigne un appareil (voire une installation industrielle, selon sa puissance) permettant de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide dit caloporteur.

Les chaudières de chauffage et celles à eau surchauffée, par exemple, peuvent être utilisées pour des besoins en chaleur de 650 à 38 000 kW. Les nombreuses options et possibilités de variation permettent d'adapter leur dimensionnement et leurs accessoires aux demandes des clients.

4.2. Aspect thermodynamique des chaudières

L'avantage de la vapeur comme fluide caloporteur réside dans le fait qu'elle présente une capacité calorifique nettement supérieure à celle de l'eau (figure 4.6).

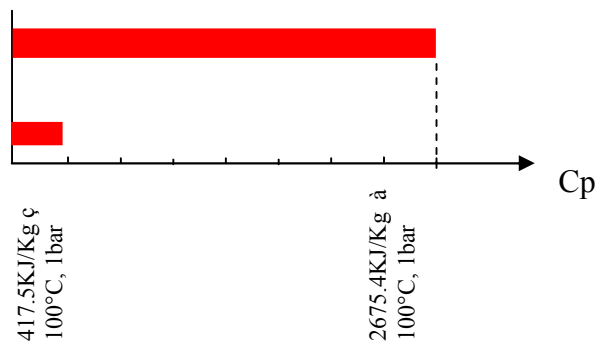


Fig. 4.6 : Capacité calorifique de l'eau et de la vapeur d'eau

Pour une masse et une température identique, la chaleur contenue dans la vapeur est plus de 6 fois celle contenue dans l'eau liquide. Ceci est dû au fait que l'évaporation de l'eau consomme une quantité d'énergie importante contenue dans la vapeur produite et qui est restituée lors de sa condensation. Ce comportement est connu par les bouilloires (figure 4.7) : pour faire évaporer le contenu d'un récipient, il faut attendre assez longtemps pour que la chaleur produite par la plaque ou le feu de la cuisinière soit absorbée.



Fig. 4.7 : Bouilloire

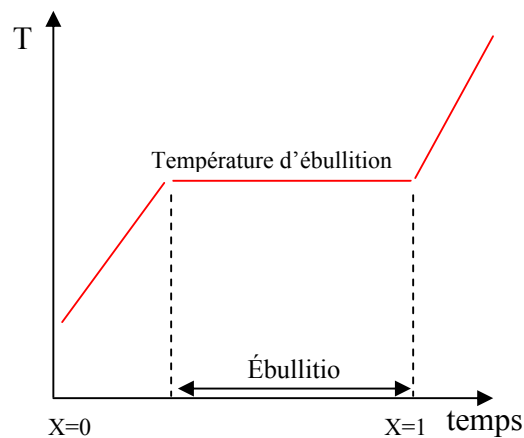


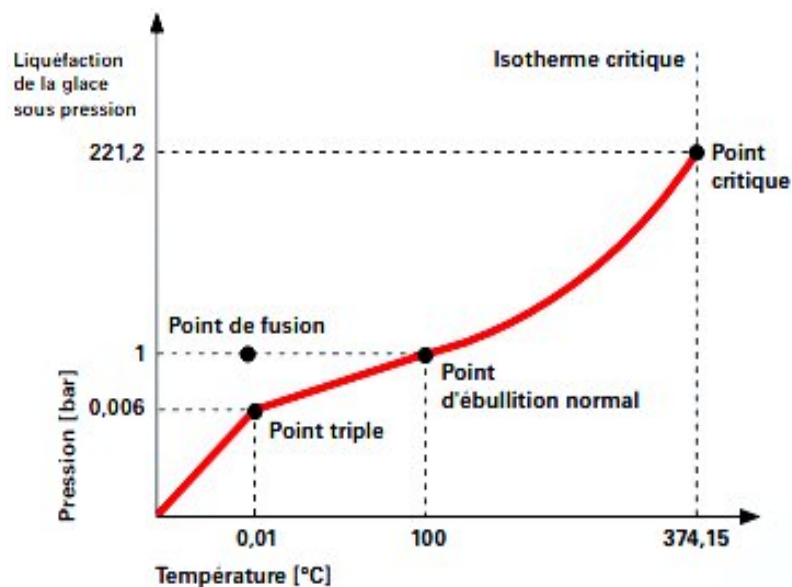
Fig. 4.8 : Processus d'ébullition

L'énergie fournie pendant le temps d'ébullition sert uniquement à l'évaporation, la température de l'eau ou de la vapeur reste constante (100°C à la pression atmosphérique) (fig. 4.8). Il en résulte un avantage évident pour la vapeur comme fluide caloporteur : pour transmettre la même quantité de chaleur, il faut déplacer seulement un sixième de la masse par rapport à celle de l'eau.

4.2 Aspect thermodynamique

4.2.1 Domaines d'utilisation de la vapeur

La vapeur est employée comme vecteur d'énergie et vecteur de substances chimiques dans un grand nombre de domaines de la production industrielle. La vapeur actionne des turbines pour produire de l'électricité, vulcanise les produits en caoutchouc et stérilise les emballages. La vapeur est produite par évaporation ou sublimation à partir de la phase liquide ou solide. Dans le sens physique, la vapeur d'eau est de l'eau sous forme de gaz. Avec le temps, il s'établit lors de l'évaporation de l'eau un équilibre dynamique où autant de particules de la phase liquide ou solide passent en phase gazeuse et inversement. La vapeur est alors saturée. Le nombre de particules passant d'une phase à l'autre est fortement fonction de la pression et de la température du système considéré.



(Figure 4.9): Valeurs matière : Densité à 100°C et 1,01325 bar : 0,598 kg/m³ Capacité calorifique spécifique : $C_p = 2,08 \text{ kJ(kg.K)}$ Conductivité calorifique : $> 0,0248 \text{ W(m.K)}$ Point triple : 0,01°C soit 273,165 K à 0,00612 bar Point critique : 374,15°C à 221,2 bar.

Si l'on fait évaporer de l'eau dans un environnement assez froid en l'alimentant en chaleur, une partie de l'eau à l'état de gaz se condense sous forme de fines gouttelettes. La vapeur d'eau est alors composée d'un mélange de fines gouttelettes et d'eau invisible à l'état de gaz. Ce mélange est appelé vapeur humide (figure 4.9).

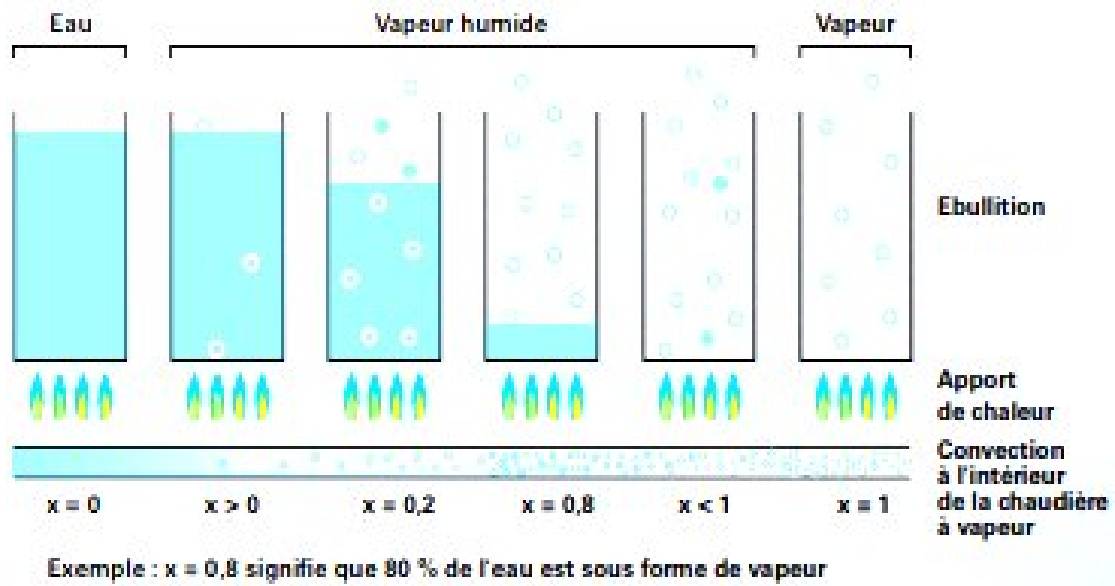


Fig. 4.10 : Vapeur humide, vapeur surchauffée, vapeur saturée

Au-dessus de cette température, la vapeur d'eau et l'eau liquide ont la même densité et cet état est donc appelé "surcritique". Il n'est pas important pour l'emploi de chaudières à vapeur. L'eau surcritique présente, d'un point de vue chimique, des propriétés particulièrement agressives. En dessous de ce point, la vapeur d'eau est donc "sous-critique" et se trouve en équilibre avec l'eau liquide. Si elle continue à monter en température dans cette zone après évaporation complète du liquide pour dépasser la température d'évaporation correspondante, il se forme de la vapeur surchauffée. Cette forme de vapeur ne contient plus de gouttelettes d'eau et est physiquement un gaz et invisible. La zone séparant la vapeur humide et la vapeur surchauffée est la vapeur saturée ou, pour faire une différence avec la vapeur humide, la vapeur sèche dans certains cas. La plupart des valeurs des tableaux de la vapeur d'eau se rapportent à cet état.

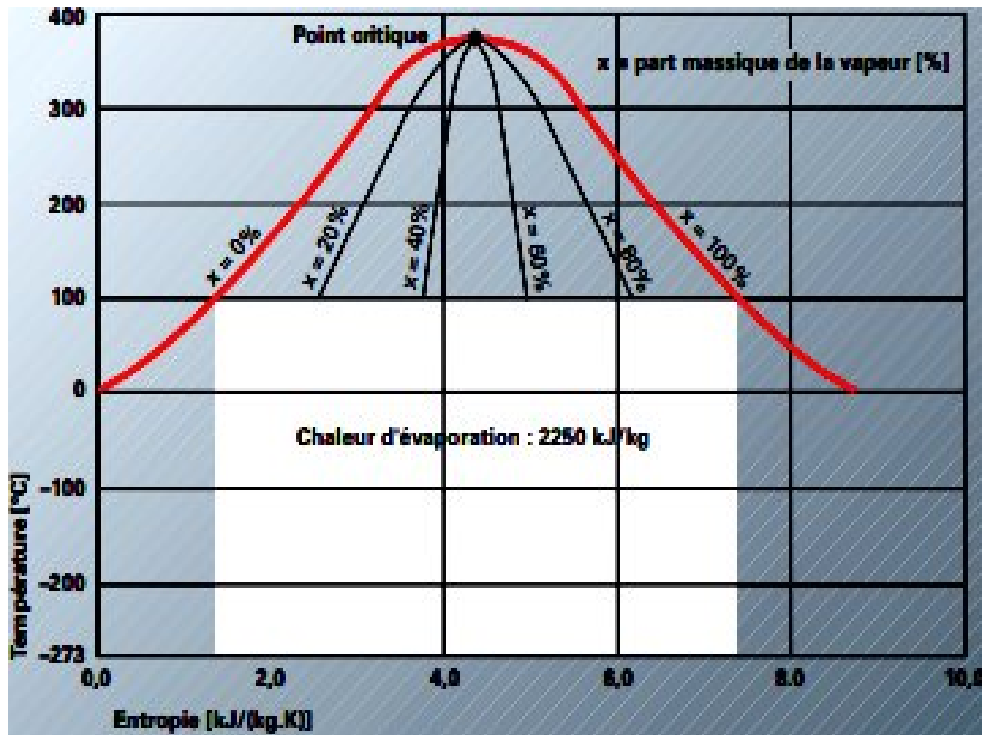


Fig.4.10 : processus d'obtention de la vapeur humide

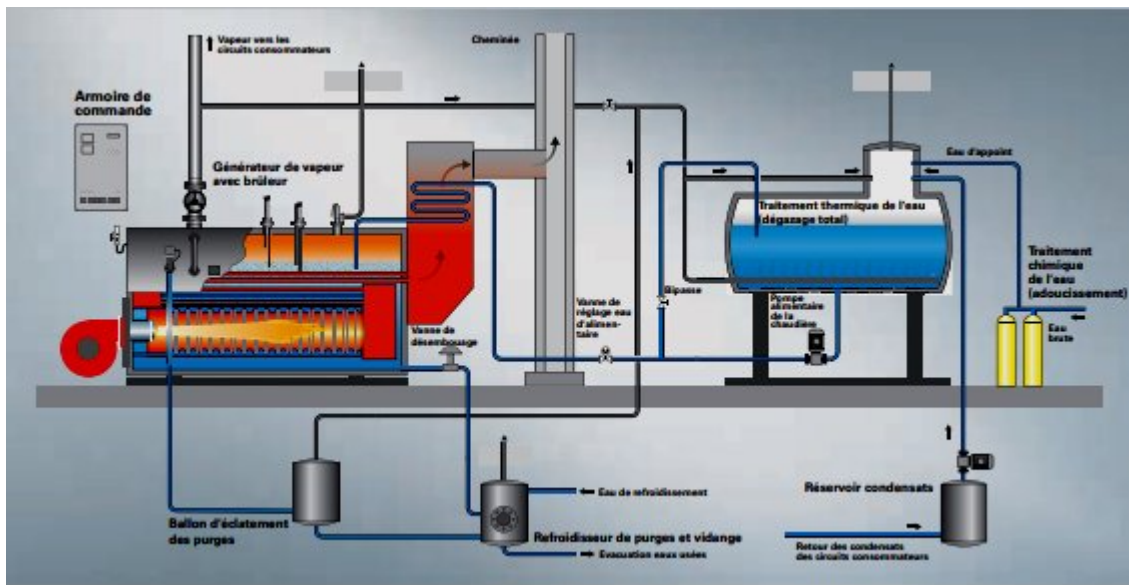


Fig. 4.11 : Composants d'une chaufferie à vapeur.

4.2.2 La chaudière thermodynamique

On parle de chaudière **thermodynamique** ou la rencontre entre la pompe à chaleur et la chaudière à condensation. La chaudière thermodynamique (différente du chauffe-eau thermodynamique) est une pompe à chaleur qui fonctionne au gaz, tout comme une chaudière à

gaz à condensation classique. Le principe bien connu de la chaudière à condensation consiste à utiliser conjointement les gaz de combustion et la vapeur d'eau chaude produite lorsque la chaudière fonctionne pour réchauffer un circuit d'eau. Grâce à ce principe, il est possible de réduire sa consommation de gaz.

Au lieu d'utiliser la chaleur produite par la combustion du gaz pour chauffer directement de l'eau de chauffage par exemple, notre technologie l'utilise pour activer un cycle de pompe à chaleur. C'est en plaçant cette innovation au cœur d'une chaudière que nous arrivons à en doubler les performances.

4.3. Différents types de chaudières :

4.3. 1- Chaudières à tubes d'eau,

La chaudière vapeur à tubes d'eau se caractérise par la présence d'un ballon supérieur et d'un ballon inférieur. Ils sont reliés entre eux par des tubes dans lesquels circule l'eau, du bas vers le haut par thermosiphon figure 4.12. Les chaudières à tubes d'eau sont réservées à des activités spécifiques comme les centrales thermiques ou les importantes cogénérations.

Les chaudières à tubes d'eau ne présentent pas de limite de taille ni de pression mais sont plus chères que les chaudières à tubes de fumées. Elles sont tous combustibles (bois, gaz, fioul, etc..)

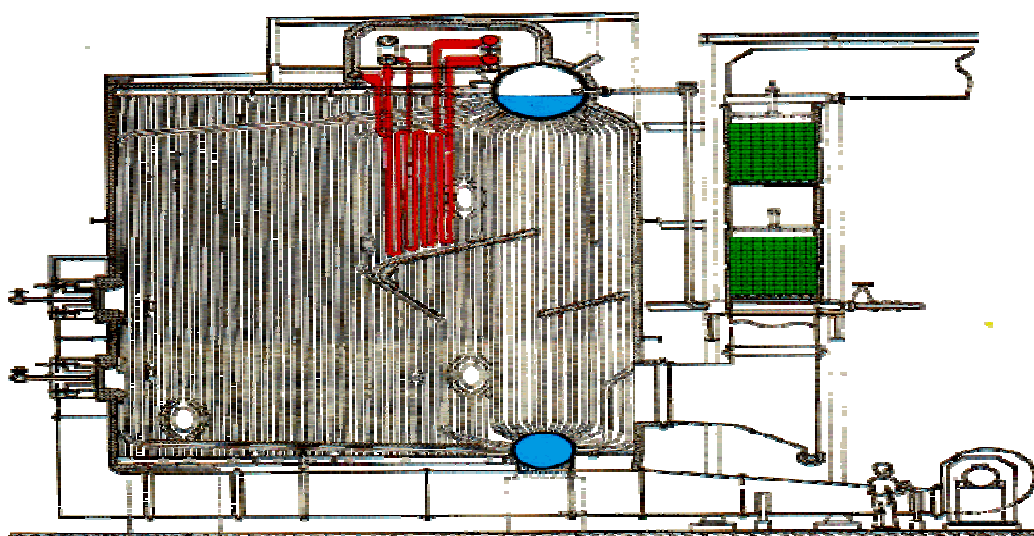


Figure 4.12: Schéma chaudière à tubes d'eau

4.3.2- Chaudières à tubes de fumées,

C'est historiquement le premier type de construction. Les premiers modèles utilisaient une circulation verticale, plus facile à réaliser, du fait de la convection des gaz, mais par la suite, on réalisa des chaudières avec un arrangement horizontal, plus adaptées, à l'utilisation pour le chemin de fer ou la navigation.



Figure 4.10 : Chaudière tubulaire neuve destinée à la locomotive

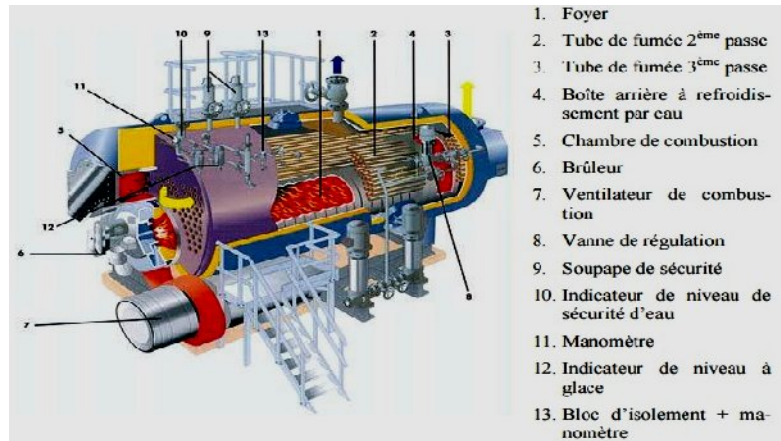


Figure 4.11 : Schéma chaudière vapeur à tubes de fumées

Une chaudière à tubes de fumées est constituée d'un grand réservoir d'eau traversé par des tubes dans lesquels circulent les fumées. Le premier tube du parcours de fumées est un tube de plus gros diamètre qui constituent le foyer. Ce type de construction est aujourd'hui utilisé presque exclusivement pour les combustibles gazeux et liquides. En effet, la forme du foyer des chaudières à tubes de fumées rend difficile l'extraction des cendres. Lorsqu'elles sont utilisées avec des combustibles solides le foyer est placé à l'extérieur de la chaudière proprement dite. Dans ce cas, le foyer est un avant foyer à tubes d'eau ou en réfractaire. Elle remplit trois fonctions successives :

- chauffer l'eau d'alimentation pressurisée jusqu'à la température de vaporisation à la pression correspondante ;
- vaporiser l'eau ;
- la surchauffer à la température désirée. Ce type de construction est généralement réservé à des puissances n'excédant pas 20 ou 30 MW.

4.3.3- Chaudières de récupération.

Presque tous les procédés industriels nécessitent de la chaleur et/ou produisent de la chaleur. Laisser la chaleur se dissiper dans l'environnement est un gaspillage et est souvent assujéti à la législation. La récupération et la réutilisation de cette chaleur rend le processus de production plus durable et offre des avantages financiers en plus du respect des exigences environnementales. C'est là que les systèmes de récupération de chaleur entrent en jeu ; ils recueillent et redirigent la chaleur « résiduelle », la réinjectent dans le process ou l'utilisent à d'autres fins. Presque tous les procédés industriels nécessitent de la chaleur et/ou produisent de la chaleur.

En concentrant l'énergie solaire, on obtient une température très élevée permettant la production de la vapeur qui va générer de l'électricité pouvant être raccordée au réseau de distribution. Une centrale solaire de ce type est constituée essentiellement d'un champ solaire et d'un cycle combiné. Ce dernier est formé d'un cycle à gaz et d'un cycle à vapeur, fonctionnant alternativement grâce à la chaudière de récupération. Cette combinaison produit de l'électricité plus efficacement qu'une turbine à gaz ou une turbine à vapeur seule.

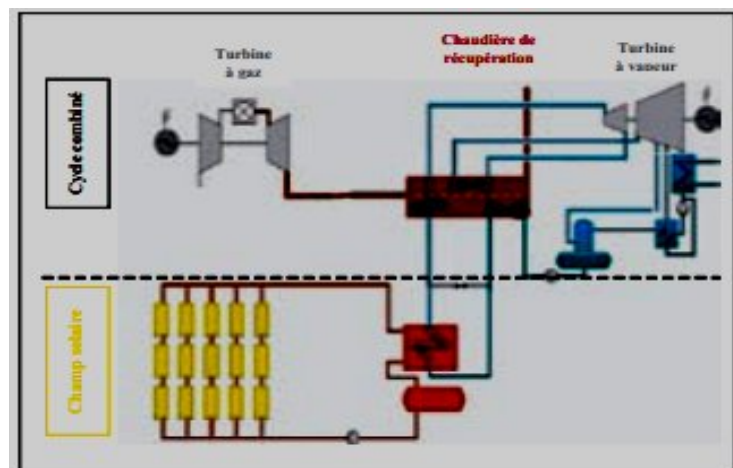


Figure 4.12 : La chaudière de récupération dans une centrale solaire à cycle combiné

4.4. Circulation de l'eau dans les chaudières.

L'ensemble des courants ascendants des bulles de vapeur et des courants ascendants d'eau, caractérise la circulation dans une chaudière, pour le bon fonctionnement de la chaudière une circulation facile est indispensable qui nécessite une certaine vitesse d'eau.

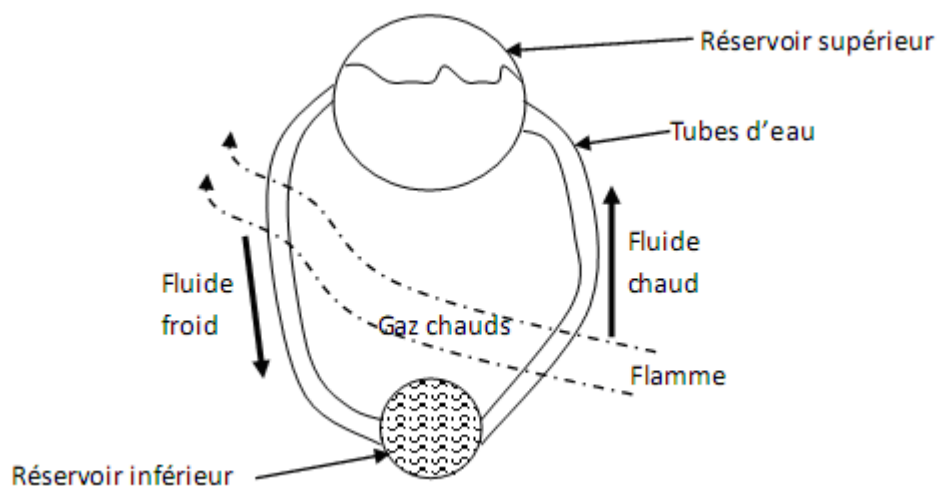
- Les vitesses trop faibles de l'émulsion d'eau et de vapeur provoquent une formation de poche de vapeur dans les tubes évaporateurs.
- Une circulation établie, uniformisant la température d'eau, élimine les déformations pouvant entraîner des tensions locales, l'arrivée de grosses bulles dans les collecteurs de vapeur ainsi que l'émulsion tumultueuse qui favorise le primage (entraînement de l'eau dans de la vapeur, aussi de la vapeur dans de l'eau).

La circulation dans la chaudière est des trois catégories que sont :

La circulation naturelle, la circulation contrôlée et la circulation forcée.

4.4.1 La circulation naturelle

Elle est basé sur le principe de densité entre l'eau dans les tubes vaporisateurs et les tubes de retour. En effet, lorsqu'on chauffe un fluide, sa masse volumique diminue. La colonne de droite (figure n°1), la première à recevoir de la chaleur du foyer, est plus chaude que la partie de gauche. Il y a alors une circulation du fluide de la colonne froide au collecteur supérieur en passant par la colonne chaude.



v

Figure 4.13 : Principe de la circulation naturelle.

Ce phénomène est accéléré par la présence de vapeur dans la colonne montante dans les chaudières à vapeur, où l'intensité de la circulation est plus forte que le volume occupé par la vapeur qui sera plus grand dans la colonne ascendante.

4.4.2. La circulation contrôlée

La circulation contrôlée représente la circulation forcée. Les chaudières dont le fonctionnement repose sur ce type se ramènent à deux types:

- ❖ Les chaudières à circulation en dérivation ou à recirculation ou à circulation en circuit fermé ou encore à circulation contrôlée;
- ❖ Les chaudières à circulation en dérivation en série ou à circulation en circuit ouvert.

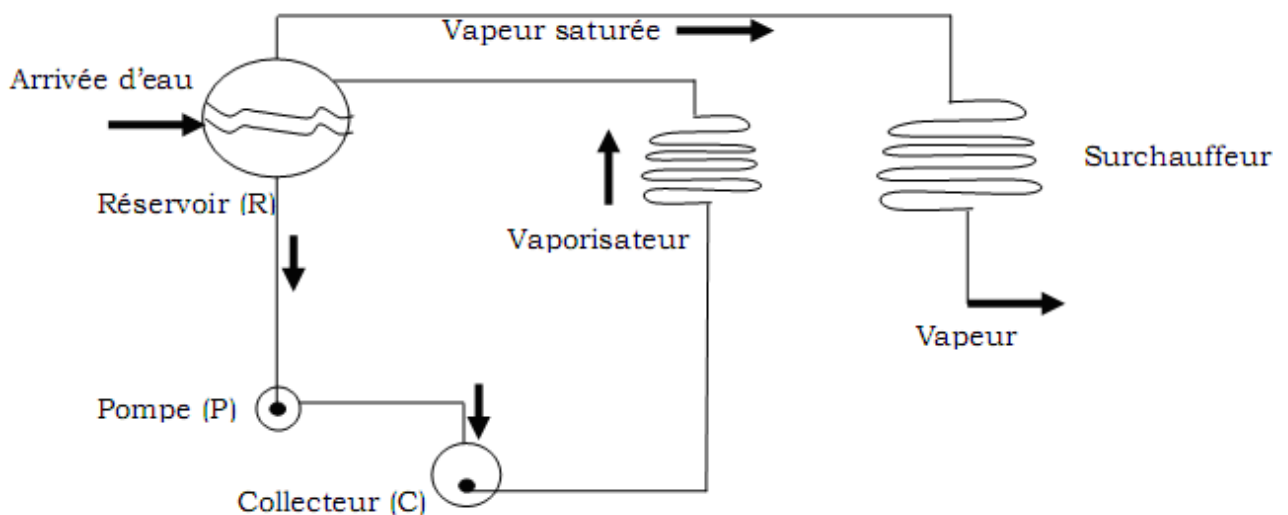


Figure 4.14 : Circulation contrôlée dans une chaudière

La distribution de l'eau dans les tubes branchés sur le collecteur se fait par le biais des tuyères calibrées placées à l'entrée de chaque tube. L'arrêter des particules solides éventuellement présentes dans l'eau d'alimentation est assuré par une crépine. Dans ce type de chaudière, avant l'allumage du feu la circulation doit être établie, la stabilisation la circulation s'effectue naturellement, ce qui réduit le temps de mise en service.

4.4.3 La circulation forcée

L'avantage de la circulation forcée est d'assurer une vitesse convenable de adéquate de fluide dans les tubes quelle que soit la pression de la chaudière.

Il n'y a pas de réservoir d'accumulation d'eau et de vapeur, dans la circulation en série, ou circulation en circuit ouvert. La vaporisation se déroule entre l'échauffement et la surchauffe dans un circuit. L'eau refoulée par la pompe est vaporisée puis surchauffée et dirigé directement à la sortie des tubes de chauffe. La circulation de l'eau dans les tubes et dans les collecteurs dès l'avant mise à feu et pendant les opérations de démarrage, est assuré par circulation forcée. Cela constitue un avantage important, puisqu'il en résulte une répartition uniforme de la température du métal et des dilatations de l'ensemble du générateur.

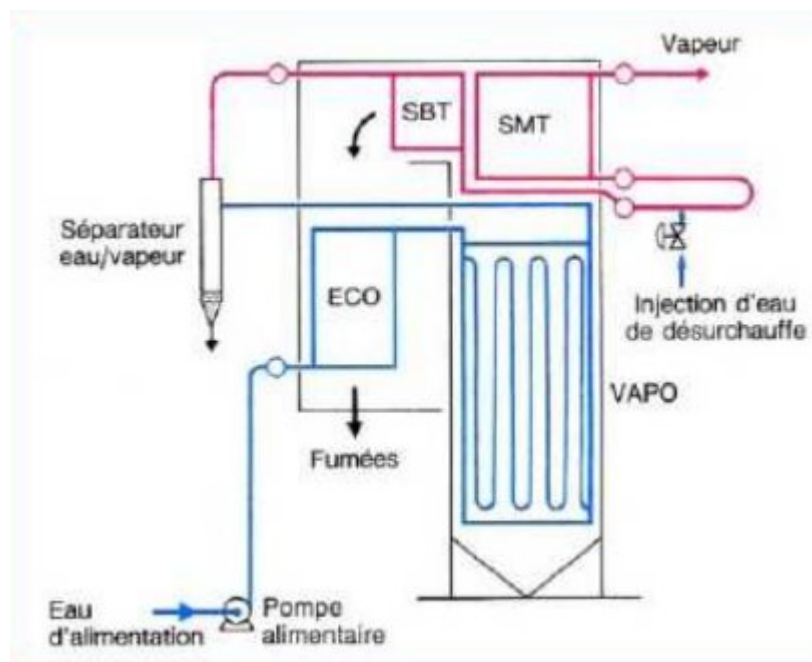


Figure 4.15 : Circulation forcée dans une chaudière

4.5. Calcul thermique d'une chaudière.

Le Bilan thermique d'une chaudière représente une caractéristique importante dans la conception d'une chaudière, il est basé sur le principe de la conservation d'énergie. Il permet de

déduire l'efficacité ou le rendement et l'économie de l'exploitation d'une chaudière. Il exprime la relation de la chaleur fournie (disponible) avec la somme de la chaleur utile (consommé).

Dans un fonctionnement permanent, l'équation du bilan thermique s'écrit :

$$Q_d^t = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (4.1)$$

Avec

Q_d^t : chaleur disponible (fourni), [Kj/Kg],

Q_1 : chaleur utile [Kj/Kg],

Q_2 : perte de chaleur avec les fumées sortantes [Kj/Kg],

Q_3 : perte de chaleur dues à la combustions incomplète du combustible, [Kj/Kg],

Q_4 : perte de chaleur dues au imbrulés [Kj/Kg],

Q_5 : perte de chaleur à travers les parois au milieu extérieur, [Kj/Kg].

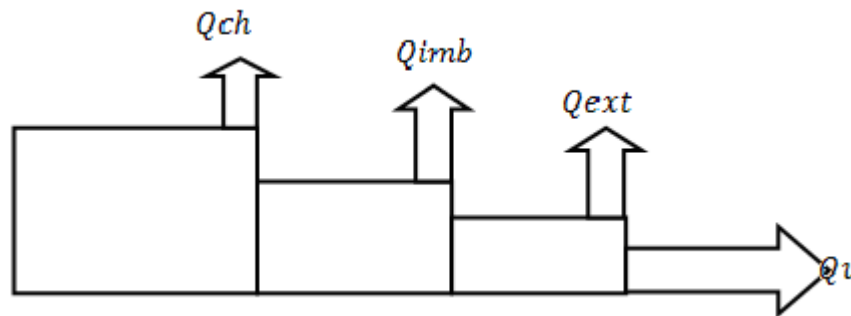


Figure 4.16 : Les différentes pertes thermique d'une chaudière

Le bilan thermique est exprimé en pour-cent de la chaleur disponible telle que :

$$q_i = \frac{Q}{Q_d^t} \times 100 \quad (4.2)$$

Avec

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 100 \quad (4.3)$$

La chaleur fournie (disponible) constitue le premier membre du bilan thermique, est composé par le pouvoir calorifique inférieur du combustible P_{ci} , par l'enthalpie du combustible h_{comb} , par la chaleur de l'air $Q_{air\ ext}$, par la chaleur introduite par l'injection de la vapeur d'eau Q_{vap} .

$$Q_d^t = P_{ci} + h_{comb} + Q_{air\ ext} + Q_{vap} \quad (4.5)$$

Pour les combustibles liquides, on tient compte de la température du combustible à l'entrée :

$$h_{comb} = C_{pcomb} \times T_{comb} \quad (4.5)$$

4.6 Principaux paramètres à surveiller lors de l'exploitation d'une chaudière.

Suite aux différents accidents qui surviennent pendant l'exploitation des chaudières des unités industrielles, il est nécessaire de rappeler quelques règles de sécurité, en insistant sur un certain nombre de points techniques et organisationnels dont certains prennent une importance particulière au vu de l'accidentologie recensée et conception et construction des équipements.

- Choix de l'implantation prenant en compte les risques d'accidents possibles dû à l'intensité des effets sur les personnes susceptibles d'être exposées dans le voisinage.
- Conception de la chaudière prenant en compte les pressions élevées susceptibles d'être atteintes dans des conditions particulières.
- Bonne qualité initiale des assemblages conditionnant la pérennité de l'étanchéité des installations.
- Emplacement, position et choix des organes de sectionnement adéquats
- Choix de commandes permettant, de visualiser la position des organes (ouvert, fermé, etc.) ainsi que la nature du fluide concerné.
- Prise en compte par les automatismes de régulation du régime de ventilation (asservissement air/gaz) de l'ensemble des phases de fonctionnement

5.4.1 Paramètres à surveiller

- Les réseaux d'alimentation en combustible ou du fluide caloporteur : Les canalisations sont protégées contre les agressions extérieures (corrosion, choc, température excessive...) et repérées par les couleurs normalisées.

Plusieurs cas d'explosions, de ruines ou d'incendies à l'intérieur de la chaudière recensés dans l'échantillon ont pour origine la vaporisation brutale du fluide caloporteur dans son circuit suite à :

- Une fissure ou rupture des tuyauteries (serpentins, tubes ...) avec ou sans défaillance des organes de sécurité. Le mauvais tirage d'une cheminée, par exemple, peut favoriser une

accumulation de gaz puis l'explosion de la chaudière. A noter également l'inflammation d'une gaine calorifugée par des fuites de fumées chaudes.

- la pollution du fluide caloporteur, du fait de la présence d'hydrocarbures dans l'eau d'alimentation conduisant à l'élévation de la température du métal des tuyauteries d'eau au-delà des valeurs de calcul utilisées, une chaudière neuve, utilisée pour le préchauffage.



Figure 4.16 : Accidents impliquant le circuit caloporteur

- Des organes de coupure sont prévus réglementairement, et permettent d'interrompre rapidement l'alimentation en combustible des appareils de combustion et de mettre le réseau en sécurité.



Figure 4.17: Vane de coupure

- Les locaux d'utilisation sont contraints de posséder une large ventilation. Cette dernière prévue réglementairement est dimensionnée pour empêcher la formation d'atmosphère

explosible ou nocive et fournir la quantité d'air nécessaire au bon fonctionnement des appareils de combustion.

- Toute tuyauterie susceptible de contenir du gaz fait l'objet d'une vérification d'étanchéité avant sa mise en service, et des vérifications techniques sont réalisées périodiquement soit selon une périodicité définie par l'exploitant, soit selon une périodicité définie par arrêté.

Enfin, en complément ci avant, il est nécessaire de protéger par un système de protection contre l'explosion le local chaufferie pour éviter des effets destructeurs liés à l'explosion de ce local. Il convient d'appliquer le principe de la protection contre l'explosion du local chaufferie, par des surfaces peu résistantes, « s'ouvrant » sous l'effet de la surpression résultant de l'explosion, et permettant la décharge des gaz d'explosion à l'extérieur de l'équipement. Ceci permet de limiter la pression maximale atteinte à l'intérieur de l'équipement et ainsi d'éviter sa destruction par l'effet de pression. La résistance d'un bâtiment de type chaufferie conditionne le scénario relatif à l'explosion d'un mélange stœchiométrique de gaz au repos. Les données constructives du local déterminent le comportement vis-à-vis de l'explosion (nature des parois, de la toiture, des ouvertures,)

4.5.2 Objet du contrôle :

- ❖ Présence du récépissé de déclaration.
- ❖ Présence des prescriptions générales.
- ❖ Présentation des arrêtés préfectoraux relatifs à l'installation, s'il y en a.
- ❖ Présence de la durée de fonctionnement