

Les Chaudières

Sommaire

- I. Introduction
- II. Bilans de matière et de chaleur dans une chaudière
- III. Les différents types de chaudières
- IV. Les problèmes spécifiques aux chaudières
- V. La vapeur à basse, moyenne et haute pression.

Introduction

Les besoins énergétiques d'une raffinerie, d'une usine chimique ou pétrochimique sont essentiellement de deux natures : **thermiques** et **mécaniques**. Les besoins thermiques sont satisfaits :

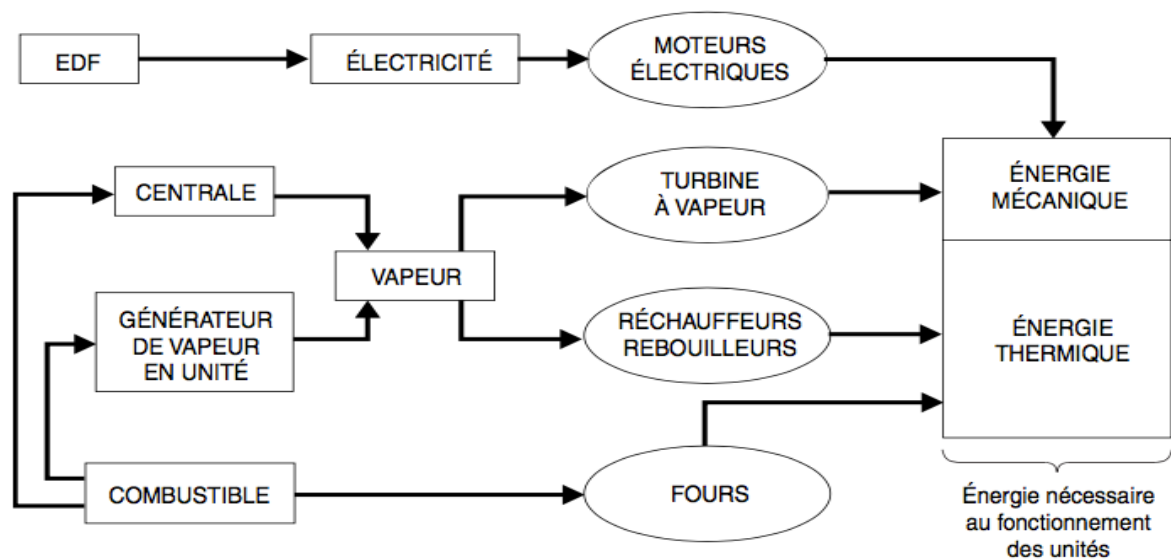
- soit par apport direct de chaleur de combustion dans les fours des unités (combustibles)
- soit par utilisation d'un fluide intermédiaire (vapeur d'eau, huile chaude) pour les besoins de réchauffage, de rebouillage

Les besoins en énergie mécanique sont quant à eux, satisfaits essentiellement par l'électricité et la vapeur au travers des moteurs électriques et turbines à vapeur.

Le combustible représente une source d'énergie que l'on peut généralement stocker (sauf excès de gaz combustible) et qui est donc disponible à la demande.

La vapeur quant à elle, a des origines diverses : centrale thermoélectrique, générateurs de vapeur dans les unités, turbines à gaz, ... L'essentiel de la production provient généralement de la centrale où la production de vapeur s'accompagne souvent de génération d'électricité.

La figure ci-dessous résume les circulations d'énergie dans une usine.



Outre son rôle particulier dans la distribution d'énergie (vapeur de réchauffage, entraînement de turbines), la vapeur d'eau intervient dans les procédés (réactif chimique, vapeur de dilution, de stripage, etc.) et constitue un élément de sécurité (vapeur d'étouffement). Les chaudières ou générateurs de vapeur sont donc indispensables dans une usine pour assurer de manière fiable le fonctionnement des unités de production.

La chaudière est un dispositif permettant de chauffer l'eau et de produire de la vapeur si l'eau est chauffée au-delà de la pression atmosphérique.

Industriellement, on utilise les chaudières pour produire la vapeur nécessaire au fonctionnement des procédés. La source de chaleur peut-être fournie par un combustible (gaz, fioul, charbon...) ou une résistance électrique.

Les chaudières industrielles peuvent être classées 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**.
- 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.

Chapitre I : Bilans de matière et de chaleur dans une chaudière

Les bilans énergétiques sont toujours la première étape dans la conception d'une centrale thermique et d'une chaudière. Ces bilans permettent d'établir un lien entre la puissance électrique, la puissance thermique ainsi que de déterminer les débits de combustible, d'air, de fumées et de vapeur.

Pour effectuer un bilan énergétique, il faut distinguer deux cas de figure selon le type de chaudière. Pour une **chaudière à combustion**, il est toujours possible de déterminer le débit de combustible nécessaire pour produire le débit vapeur tandis que pour une **chaudière de récupération**, le(s) débit(s) vapeur résultent uniquement de la conception des surfaces d'échange et des paramètres débit, température et pression des fluides à l'entrée de la chaudière.

Avant de pouvoir définir les dimensions de matériel et en prélude à toute recherche de conditions de fonctionnement, il est nécessaire pour une allure déterminée de la chaudière d'effectuer successivement les calculs préalables suivants associés à quelques estimations annexes :

- **pour les bilans énergétiques :**
 - calcul de la puissance utile,
 - estimation du rendement attendu,
 - calcul de la puissance à introduire dans la chaudière sous forme de combustible,
 - calcul du débit massique (ou volumique) de combustible ;
- **pour le bilan matière :**
 - estimation de l'excès d'air nécessaire à l'obtention d'une combustion correcte (fonction de la nature du combustible),
 - calcul du débit d'air nécessaire à la combustion,
 - calcul du débit (massique et volumique) des fumées engendrées par la combustion, et éventuellement de la quantité de cendres produites.

Il est évident que chacun de ces calculs ne peut être effectué qu'à partir des résultats des calculs précédents. Les valeurs obtenues sous forme de puissance introduite, de débit de fumées et de composition de celles-ci sont nécessaires pour le calcul du comportement du foyer et des échangeurs.

I.1. Connaissances nécessaires pour aborder le calcul d'une chaudière

Elles appartiennent à différents domaines.

➤ Thermique et thermodynamique :

- ❖ notions de température relative et de température absolue ;
- ❖ transmission de la chaleur par rayonnement, conduction et convection ;
- ❖ calcul des échangeurs ;
- ❖ notions d'équivalence travail-chaleur et d'enthalpie ;
- ❖ bilan calorifique

Et dans le cas où la chaudière est associée à un cycle de production d'énergie mécanique ou électrique :

- ❖ notions d'entropie ;
- ❖ détente adiabatique ;
- ❖ principe de Carnot ;
- ❖ cycles d'utilisation ;
- ❖ marche de la turbine en pression fixe, ou pression glissante ;
- ❖ intérêt de la surchauffe, de la resurchauffe et des soutirages.

➤ **Dynamique des fluides :**

- ❖ écoulement externe, air et gaz autour des tubes, tourbillons de Karman ;
- ❖ écoulement interne (dans les gaines ou les tubes) ;
- ❖ distribution entre circuits parallèles ;
- ❖ pertes de charge ;
- ❖ écoulement diphasique ;
- ❖ acoustique (vibrations, énergie de détente).

➤ **Chimie :**

- ❖ lois de combustion ;
- ❖ équilibre (CO , CO_2 , H_2O vapeur), dissociation (NO_x , imbrûlés gazeux) ;
- ❖ traitement de l'eau ;
- ❖ corrosion à haute température et à basse température ;
- ❖ fusibilité des cendres.

➤ **Physique :**

- ❖ des fluides (eau, vapeur) : utilisation des tables de vapeur ;
- ❖ des gaz : capacité thermique massique, viscosité, etc.

➤ **Résistance des matériaux :**

- ❖ calcul des contraintes : domaine élastique, domaine plastique (fluage), localisation des contraintes ;
- ❖ sélection des matériaux soumis à haute température.

I.2. Principe du bilan thermique

La chaleur contenue dans la combustion n'est que partiellement transmise au fluide caloporteur ; la différence étant les pertes. Le bilan thermique permet de classer les différentes quantités de chaleur évoluant dans un appareil en trois catégories :

- les chaleurs fournies (Q) ;
- les chaleurs utilisées (Q_u) ;
- les chaleurs perdues (Q_p).

$$Q = Q_u + Q_p$$

$$Q = Q_u + Q_{comb} + Q_{ext}$$

$$Q = Q_u + Q_{ch} + Q_{imb} + Q_{ext}$$

si $Q_{imb} = 0$ alors :

$$Q = Q_u + Q_{ch} + Q_{ext}$$

Q_{ch} : est la chaleur perdue dans la chambre de combustion

Q_{ext} : est la chaleur perdue à l'extérieur

Q_{imb} : est la chaleur perdue par les imbrûlés

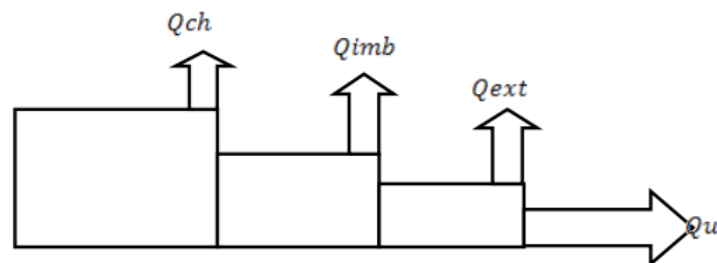


Figure I-1 : Schéma de principe du bilan thermique d'une chaudière

Le bilan thermique montre que la chaleur produite à partir de 1kg de combustible se divise en quatre parties essentielles :

$$PCI = Q_u + Q_{ch} + Q_{imb} + Q_{ext}$$

$$100 \% = \%Q_u + \%Q_{ch} + \%Q_{imb} + \%Q_{ext}$$

avec $Q_u = M_E \times C_{PE} \times (t_s - t_e)$: la chaleur fournie à la chaudière par rayonnement et par convection (chaleur sensible sans changement d'état).

$$Q_u = [M_E \times C_{PE} \times (t_{sat} - t_e)] + [M_C \times L_{vap}] + [M_V \times C_{PV} \times (t_s - t_{sat})]$$

$$Q_u = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Q_1 : la chaleur sensible nécessaire pour élever la température de l'eau à l'entrée jusqu'à sa température d'ébullition ;

Q_2 : la chaleur latente de vaporisation de l'eau à sa température de saturation,

Q_3 : la chaleur sensible pour porter la vapeur produite de sa température d'ébullition à sa température de sortie.

$Q_{ch} = V_F \times C_{PF} \times (t_{ch} - t_a)$: Chaleur sensible des gaz de combustion à la sortie de la chaudière (chaleur perdue à la cheminée par les fumées) avec V_F : le volume des fumées en m^3 et C_{PF} la chaleur spécifique des fumées en $kcal/m^3$.

$$P_{ch}(\%Q_{ch}) = K \cdot \frac{t_{ch} - t_a}{CO_2} \dots (en \%) \dots \text{Formule de SIEGERT}$$

$K=0,67$ pour le charbon minier

$K=0,59$ pour l'huile extra-légère (gasoil)

$K=0,48$ pour le gaz naturel

$K=0,80$ pour le coke

$K=0,45$ pour le gaz de ville

$K=0,53$ pour le butane

$K=0,52$ pour le propane et l'air propane

$P_{imb}(\%Q_{ch}) = \dots \%Q_{imb \text{ solides}} + Q_{imb \text{ gazeux}}$ Pour les combustibles solides

$P_{imb}(\%Q_{ch}) = \%Q_{imb \text{ gazeux}}$ Pour les combustibles gazeux

$$\%Q_{imb \text{ solides}} = \frac{8100 \times A \times a}{B \times PCI}$$

avec A : la quantité de résidus tombant dans le cendrier (en kg/h)

a : le pourcentage de matière dans les résidus (en %)

B : la consommation horaire de combustible (en kg/h).

$$\%Q_{imb \text{ gazeux}} = \frac{Z \times \%CO_2}{\%CO + \%CO_2}$$

avec $Z = 60$ pour le charbon

$Z = 60$ pour le lignite

$Z = 60$ pour l'huile

$P_{comb}(\%Q_{comb}) = \dots \%Q_{imb \text{ solides}} + Q_{imb \text{ gazeux}} + \%Q_{ch}$ pour les combustibles solides

$$P_{imb}(\%Q_{ch}) = \%Q_{imb\ gazeux} + \%Q_{ch} \text{ pour les combustibles gazeux}$$

$$\eta = 100 - \%Q_{comb}$$

Q_{ext} l'énergie dissipée par le corps de la chaudière dans le local de la chaufferie par 1 kg de combustible brûlé ; pertes par rayonnement et convection du corps de chaudière plus les différentes pertes indéterminées. La valeur de Q_{ext} est difficilement calculable. Elle varie de 1 – 5% de l'énergie de combustible brûlé suivant le calorifugeage de la chaudière, son type, sa taille, ..., etc. Difficilement chiffrables les pertes par radiation s'obtiennent approximativement à l'aide de l'abaque établi par l'organisme américain « American Boiler Manufacturers Association ». Cet organisme recommande d'ajouter systématiquement, à tous les bilans, des pertes supplémentaires correspondant aux pertes indéterminées. Ce supplément est un terme de bouclage équilibrant le bilan et représentant les imperfections de mesure et les éléments difficilement mesurables comme les imbrûlés en hydrocarbures lourds par exemple.

I.3. Rendement des chaudières

Le rendement global de la chaudière est légèrement inférieur au rendement de la combustion à cause des déperditions thermiques Q_{ext} . Il est égal au rapport de l'énergie totale produite par la chaudière sur l'énergie disponible dans le combustible brûlé. Le rendement thermique des chaudières peut s'exprimer de deux manières : la méthode directe et la méthode indirecte.

I.3.1. Méthode directe

Elle consiste à comparer la chaleur effectivement reçue par le fluide caloporteur avec la chaleur produite par la combustion du combustible.

$$\eta_{th} = \frac{\text{chaleurs utilisées}}{\text{chaleurs fournies}} = \frac{Q_u}{PCI}$$

Cette méthode nécessite des mesures précises à l'aide d'instruments étalonnés préalablement ; elle est alors délicate et complexe.

I.3.2. Méthode indirecte

Cette méthode repose sur la détermination des pertes diverses (combustion, déperditions thermiques, ..., etc.) qui interviennent au cours de la combustion et de l'échange de chaleur.

$$\eta_{th} = \frac{\text{chaleurs fournies} - \text{chaleurs perdues}}{\text{chaleurs fournies}} = \frac{PCI - (Q_{ch} + Q_{imb} + Q_{ext})}{PCI}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{(Q_{ch} + Q_{imb} + Q_{ext})}{PCI}$$

La méthode indirecte donne des résultats satisfaisants pour des contrôles courants d'exploitation. Elle peut s'effectuer sans mesures de débit. C'est la manière la plus pratique et la plus précise pour déterminer le rendement d'une chaudière installée. Par cette même méthode, le rendement peut s'exprimer en fonction des pourcentages :

$$\eta_{th} = 100\% - (\%Q_{com} + \%Q_{ext})$$

La valeur exacte du rendement global ne peut être établie que par un essai complet en marche avec établissement du bilan thermique. Que le rendement thermique soit calculé par la méthode directe ou par celle des pertes, tous les éléments permettant de calculer l'énergie utile produite sont mesurés à intervalles aussi rapprochés que possible au cours d'un essai de la chaudière, appelé essai de détermination du rendement. La durée de cet essai ne peut être inférieure à 8 heures. Elle peut être réduite à 6 heures et même à 4 heures lorsque le gaz ou le fuel-oil sont employés comme combustibles.

Les mesures essentielles à réalisées au cours de l'essai afin de pouvoir par la suite effectuer le bilan sont :

- La quantité de combustible brûlé (mesurée par pesée, capacité jaugée, débitmètre ou compteur) ;
- La température de combustible lorsqu'il est réchauffé ;
- Pour les chaudières à vapeur : débit, pression et température de la vapeur produite ainsi que son titre éventuellement ;
- Pour les autres générateurs : débit et température du fluide caloporteur en sortie ;
- La température de l'eau d'alimentation (ou autre fluide éventuel) à l'entrée ;
- La température et si nécessaire, l'humidité de l'air comburant ;
- Les pourcentages de CO₂, et de O₂ ainsi que les imbrûlés gazeux ;
- Pour les chaudières à vapeur, le débit de purge continue ;

Dans le cas des combustibles solides, la quantité des cendres évacuées par les cendriers et les dépoussiéreurs, ainsi que la teneur de celles-ci en imbrûlés solides.

I.3.3. Exploitation des chaudières

Quand on parle de chaudière, on parle de flamme et donc de combustion. Pour un débit donné de combustible, la combustion sera différente suivant la quantité d'oxygène disponible. Pour régler la combustion, il faut régler le débit d'air. Aussi, le brûleur par exemple doit-il être adapté à la chaudière! En raison du type de générateur et de vapeur produite et des caractéristiques de l'eau brute, il faut adopter le traitement d'eau qui permettra la purge la plus réduite. La vapeur d'eau, en raison des avantages qu'elle procure, est beaucoup utilisée pour le transport de chaleur.

I.4. Bilan matière

I.4.1. Calcul du débit d'eau de purge d'une chaudière :

On rappelle que les purges de déconcentration d'une chaudière permettent de maintenir une concentration de sels totaux inférieure au seuil de saturation, pour éviter la cristallisation des sels sur les tubes de la chaudière.

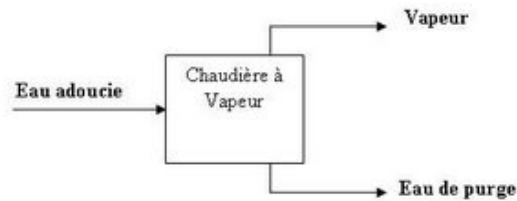


Figure I-2. Bilan matière d'une chaudière à vapeur

Les vapeurs sont supposés exemptes de sel

Pour un calcul rapide, on estime que la conductivité d'eau est proportionnelle à la salinité pour un même mélange de sels.

Toute la masse des sels qui entre avec l'eau d'alimentation de chaudière sort avec les eaux de purge (conservation de masse)

(Le débit d'eau d'alimentation) * (la conductivité d'eau d'alimentation) = (le débit d'eau de purge) * (conductivité d'eau de purge)

Le débit d'eau de purge = débit de vapeur * (concentration en sel d'eau d'alimentation) / (concentration en sel d'eau d'alimentation - concentration en sel d'eau de purge))

En pratique on utilise des conductimètres pour contrôler les eaux des chaudières

La formule devient ;

Débit d'eau de purge = débit de vapeur * (conductivité d'eau d'alimentation) / (conductivité d'eau de purge - conductivité d'eau d'alimentation)

Si une eau d'alimentation de chaudière a une conductivité de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$

La conductivité maximale d'eau de purge est de 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Le débit de purge est de $1/7$ * débit de vapeur de la chaudière

Chapitre II : Les différents types de chaudières

Les chaudières industrielles peuvent être classées 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 combustibles. Selon que ce sont l'eau ou les fumées de combustion qui circulent dans un faisceau tubulaire, on distingue **les chaudières à tubes d'eau** et **les chaudières à tubes de fumées**,
- **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.

II.1. Classification des chaudières

Il existe une grande variété de types de chaudières. Une classification peut considérer plusieurs points de vue.

II.1.1. Selon le mode d'emploi

Selon ce mode on distingue :

- Les chaudières fixes
- Les chaudières mobiles avec l'application à la traction motrice

II.1.2. Selon la disposition générale

On distingue dans ce mode :

- Les chaudières horizontales
- Les chaudières verticales

II.1.3. Selon le mode de construction

Il y a dans ce mode, trois types de chaudières :

- Les chaudières à bouilleurs ;
- Les chaudières à tubes fumées
- Les chaudières à tubes d'eau ou à faisceaux tubulaires.

II.1.4. Selon le mode chauffage

Dans ce mode, on se base sur la disposition du foyer ; ainsi, on distingue :

- Les chaudières à foyer intérieur à l'appareil

- Les chaudières à foyer extérieur.

II.1.5. Selon la nature de la vapeur produite

La nature de la vapeur générée par une chaudière est en étroite relation avec la pression de vapeur établie. On distingue alors :

- Les chaudières à basse pression : $P < 5$ bars
- Les chaudières à moyenne pression : $5 \text{ bars} < P < 45$ bars
- Les chaudières à haute pression : jusqu'à la pression critique qui est $P = 225,5$ bars
- Les chaudières à pression supercritique : $P > 225,5$ bars

II.1.6. Selon la vitesse de circulation de l'eau

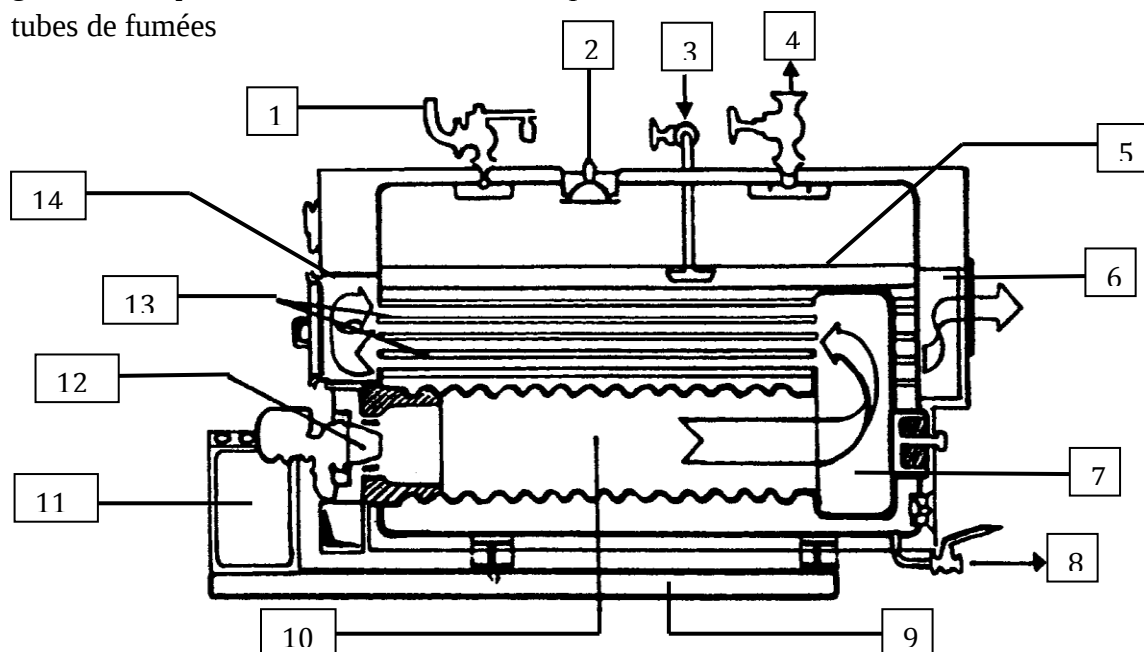
Selon ce mode de classification, on distingue quatre classes de chaudières :

- Classe A : ce sont les chaudières dites sans circulation : $V < 1$ m/s
- Classe B : ce sont les chaudières dites à circulation modérée : $1 < V < 5$ m/s
- Classe C : ce sont les chaudières dites à circulation accélérée : $5 < V < 9$ m/s
- Classe D : ce sont enfin les chaudières à circulation forcée : $V \geq 10$ m/s.

II.2. Les chaudières à tubes de fumées

chaudières (production inférieure à 25 t/h) générant de la vapeur saturée à une pression inférieure à une vingtaine de bars.

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 constitue le foyer. Ce type de construction est aujourd'hui utilisé presque exclusivement pour les combustibles gazeux et liquides. Le schéma ci-dessous présente la vue éclatée d'une chaudière à tubes de fumées



1. Foyer

Figure II.1 : Schéma d'une chaudière à tubes de fumée

2.

Tube de fumée 2ème passe

3. Tube de fumée 3ème passe

5. Chambre de combustion

7. Ventilateur de combustion

9. Soupape de sécurité

11. Manomètre

13. Bloc d'isolement + manomètre

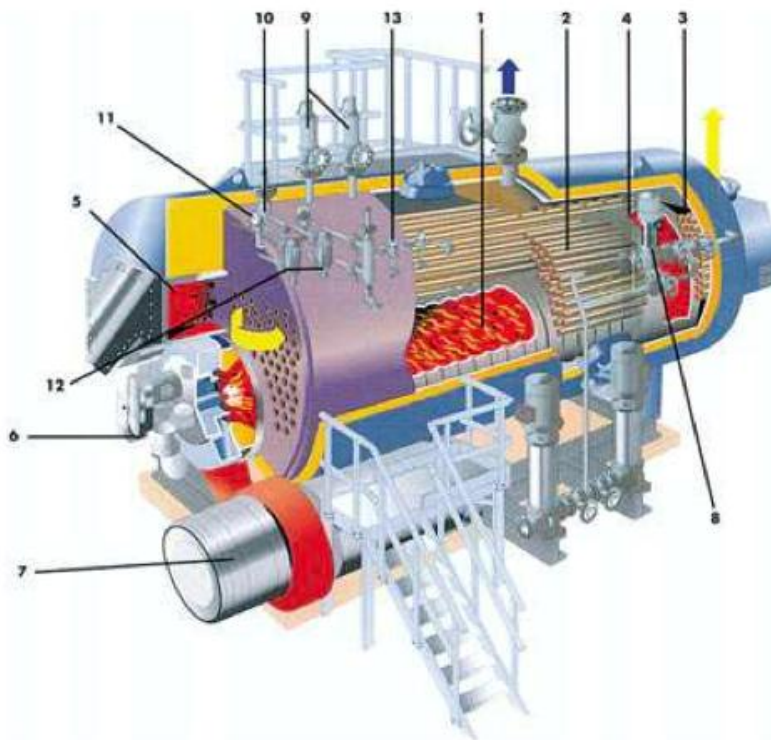
4. Boîte arrière à refroidissement par eau

6. Brûleur

8. Vanne de régulation

10. Indicateur de niveau de sécurité d'eau

12. Indicateur de niveau à glace



1. Foyer

2. Tube de fumée 2^{ème} passe

3. Tube de fumée 3^{ème} passe

4. Boîte arrière à refroidissement par eau

5. Chambre de combustion

6. Brûleur

7. Ventilateur de combustion

8. Vanne de régulation

9. Soupape de sécurité

10. Indicateur de niveau de sécurité d'eau

11. Manomètre

12. Indicateur de niveau à glace

13. Bloc d'isolement + manomètre

II.3. Les chaudières à tubes d'eau

a) Présentation

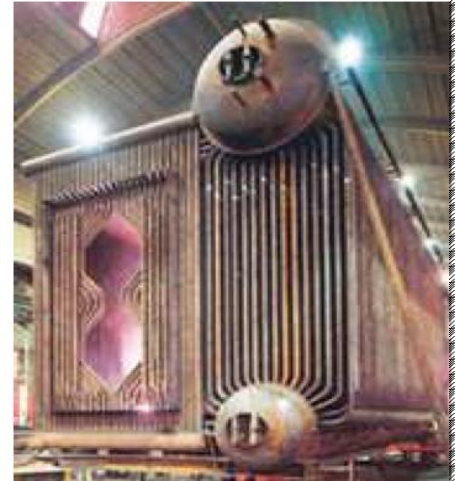
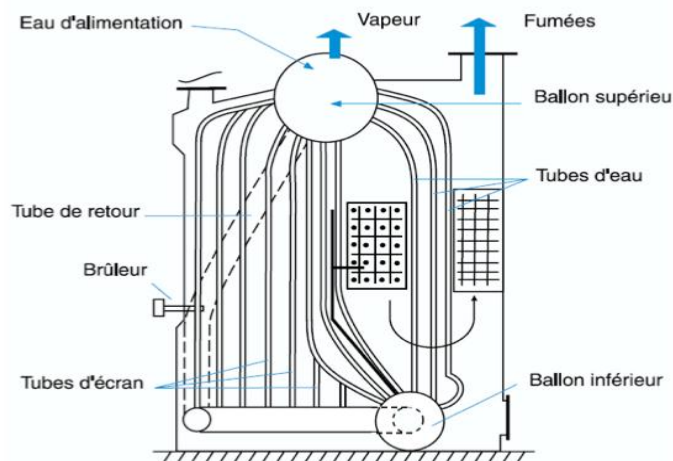
Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée supérieur à 20 tonnes/heure, en moyenne et haute pression. Le combustible utilisé est soit du gaz, du fioul, du charbon ou déchets.

b) Fonctionnement

Ce type de chaudière possède deux réservoirs appelés ballon distributeur (en partie inférieure) et ballon collecteur (ou encore ballon de vaporisation, en partie supérieure), reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs, dans cet ensemble circule l'eau qui se transforme en vapeur.

Les gaz chauds produits par le brûleur sont directement en contact avec les tubes vaporisateurs, à l'intérieur de ceux-ci se produit la vaporisation. La vapeur ainsi générée est collectée dans le ballon supérieur, l'eau excédentaire est ramenée vers le ballon inférieur par des tubes de chute non soumis à la chaleur. Dans le domaine des hautes pressions, une pompe peut être installée pour faciliter cette circulation du haut vers le bas.

Il y a donc circulation de l'eau dans des tubes placés à l'intérieur d'une enceinte contenant les gaz chauds.



II.4. Comparaison des performances

Propriétés	Chaudières à tubes de fumée	Chaudières à tubes d'eau
Mise en route (à puissance équivalente)	Lente (grand volume d'eau à chauffer)	rapide
Adaptation aux changements de régime	médiocre (inertie importante)	bonne
Surface de chauffe	moyenne	élevée
Sécurité	médiocres	bonne
Encombrement	faible	fort
Prix	limité	élevé

Applications usuelles - Puissance - Débit - Timbre (pression max. d'utilisation)	- Moyennement élevée - 1,5 à 25 t/h - 10 à 20 bar	- importante - 4 à 200 t/h - 90 à 100 bar (en circulation naturelle) et jusqu'à 225 bar (circulation forcée)
---	---	--

	Chaudières à tubes de fumée	Chaudières à tubes d'eau
Avantages	- stabilité de la production de vapeur et capacité de fournir des pointes de demande de courte durée - robustesse, durée de vie car fonctionnement très stable - très bon rendement instantané : plus de 95% avec économiseur - moindre sensibilité à la qualité de l'eau (eau adoucie) - possibilité de moduler sur toute la plage du brûleur et même de l'éteindre si la demande est inférieure à son minimum - références et exemples d'application plus nombreux - niveau de bruit relativement faible	- très faible inertie, démarrage très rapide (5 à 20 minutes), possibilité de répondre rapidement à une augmentation brusque mais prolongée de la demande - rendement annuel moyen élevé en fonctionnement intermittent - compacité et légèreté - instabilité à bas régime, le brûleur ne peut être éteint que sous certaines conditions - absence de risque d'explosion du côté vapeur (petit volume) - possibilité de fonctionnement sans surveillance pendant une longue période, jusqu'à une semaine (168 h)
Inconvénients	- inertie, démarrage lent depuis situation froide	- moins robuste (mais possibilité plus souple de remplacement de certains composants)

- pertes liées aux extinctions-rallumages; pénalisant en fonctionnement intermittent - poids et masse d'eau élevés, encombrement - risque théorique d'explosion côté vapeur (grand volume) - absence de surveillance durant 72 h au maximum, sous conditions	- plus grande sensibilité à la qualité de l'eau d'alimentation (eau déminéralisée requise si densité de flux élevée) - niveau de bruit légèrement plus élevé - durée de vie plus réduite car fonctionnement moins stable
---	--

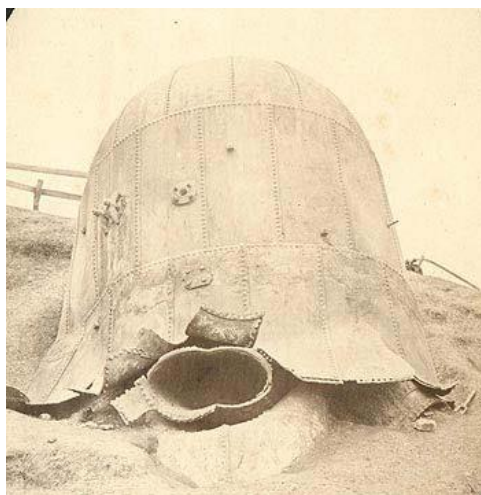
Chapitre III : Les problèmes spécifiques aux chaudières

III.1. Les problèmes dans la chaudière

Dans la chaudière, plusieurs problèmes peuvent survenir durant son service, du fait qu'elle travaille dans des conditions sévères, haute température (487°C), haute pression (73 bars), environnement corrosif et fonctionnement continu (parfois des jours sans arrêt). Ces problèmes ont une influence sur le bon fonctionnement de la chaudière, et parfois des conséquences graves, telles que des explosions. Généralement, les explosions des générateurs de vapeur sont de deux sortes :

1. Explosion des parties sous pression (côté eau).
2. Explosion de la chambre de combustion (côté feu).

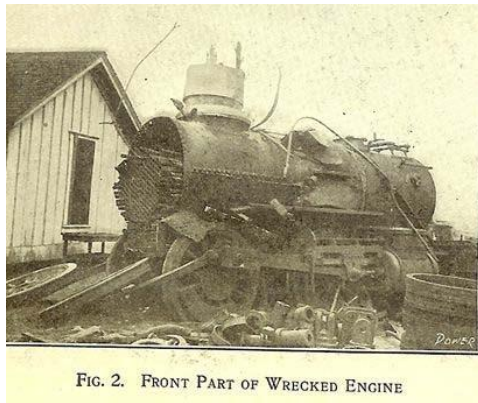
La figure III.1 représente quelques exemples d'explosion des générateurs de vapeur.



London, 15 Avril 1862



New-Hampshire, 22 Mai 1893



Texas, 8 Février 1911.



Singapour, 9 Décembre 2000

Figure III.1 : Exemples d'explosion des chaudières à vapeur.

Les causes qui conduisent à l'explosion d'une chaudière sont diverses. Les plus importantes et les plus fréquentes étant :

III.1.1. Manque d'eau

Pour une chaudière, le manque d'eau est sans doute l'incident le plus sérieux qui puisse survenir, car, le niveau d'eau dans le ballon diminue rapidement et les parois des tubes sont surchauffées. Cet incident peut être provoqué par un mauvais fonctionnement de l'alimentation, causé par la défaillance d'une pompe d'eau alimentaire, la carence de la commande automatique, ou par une rupture dans un tube, etc. Cet accident menace l'intégrité structurale du système et provoque l'explosion des parties sous pression du générateur de vapeur.

Les opérations à effectuer dans ce cas sont :

- Stopper les feux immédiatement (ils seront coupés automatiquement si le niveau de l'eau est très bas).
- Prendre l'alimentation en manuelle et procéder à :
 - a) Si le débit d'eau d'alimentation, bien qu'insuffisant, s'est maintenu il faut le réduire progressivement sans toutefois l'annuler.
 - b) Si l'eau d'alimentation, après disparition temporaire, redevient disponible, il faut reprendre l'alimentation à un débit très nettement inférieur à celui

enregistré au moment de l'incident, pour le stabiliser à une valeur faible correspondant à celle de la dernière phase du cas précédent.

Le but de la mise en commande de l'alimentation et de la réduction graduelle du débit d'eau est d'éviter de baigner brutalement certaines parties sous pressions où le métal aurait pu être surchauffé.

- A faible débit, et feux stoppés, le niveau doit se refaire très lentement. Il faut donc suivre la montée pour la mise à niveau normal, puis fermer l'alimentation pour contrôler la tenue de ce niveau. S'il se maintient, (preuve que la chaudière n'a pas souffert) l'unité pourra être normalement remise à feu.
- Si le niveau ne se maintient pas, il faut réduire la pression de la vapeur graduellement en ouvrant la purge à la sortie de la surchauffeur. La chaudière se refroidit peu à peu, et le débit d'air est réduit. Dès que la chaudière est refroidie et sa pression abaissée à la pression atmosphérique, le ventilateur sera arrêté.
- Ne jamais vider la chaudière jusqu'à ce que le foyer soit assez froid. Avant la vidange de la chaudière, examiner l'unité pour y déceler les effets possibles d'une surchauffe localisée tels que fuites ou déformation de certaines parties sous pression.

III.1.2. Rupture des tubes

Plusieurs paramètres peuvent produire une rupture dans les tubes vaporisateurs, on peut citer la défaillance ou la corrosion des tubes. Quand l'incident se produit, le ballon supérieur (réservoir) se vide rapidement. L'eau d'alimentation qui entre dans le réservoir vient directement en contact avec les parois du ballon, ce qui entraîne des tensions dangereuses du fait de la grande différence de température entre l'eau d'alimentation et celle des tôles.

Les opérations à effectuer dans le cas de cet incident sont les suivantes :

- Si la fuite dont la conséquence est une perte d'eau peu importante, le niveau doit être maintenu et la chaudière mise hors service de manière normale.

- En cas de rupture créant une perte d'eau tel que le niveau ne peut être maintenu avec le débit maximum des pompes alimentaires, il faut procéder sans délai aux opérations successives suivantes :
 - Stopper les feux immédiatement et complètement.
 - Réduire les ventilateurs de soufflage dès la disparition de la flamme
 - Couper l'alimentation de la chaudière.
 - Régler le soufflage pour assurer l'échappement à la cheminée de la vapeur formée dans le foyer.
 - Isoler la chaudière côté vapeur.
 - Pendant la chute de la pression à la chaudière, réduire progressivement le soufflage, et assurer l'échappement de la vapeur à la cheminée.
 - Laisser en service le soufflage pendant 2 à 3 heures après la chute de la pression effective de la chaudière à zéro.

III.1.3. Mauvaise combustion

Si la combustion est élevée plus que la moyenne de fonctionnement, le niveau d'eau diminue rapidement dans la chaudière et la pompe d'alimentation travaille beaucoup ce qui peut causer sa surchauffe et par la suite son endommagement. Un autre incident peut se produire tel que l'arrêt d'urgence du combustible, dans ce cas il faut exécuter les opérations suivantes :

- Maintenir le débit d'air à 30% environ pour purger le circuit des fumées pendant au moins 5 minutes
- S'assurer que toutes les vannes individuelles gaz aux brûleurs sont fermées

III.1.4. Explosion du foyer

Les explosions de foyer sont généralement le résultat des causes suivantes :

- L'existence de combustible imbrûlé dans le foyer résultant d'une combustion incomplète ou d'un manque d'allumage

- Le mélange de ce combustible imbrûlé avec l'air en proportion explosive Les explosions de foyer peuvent être évitées en prenant quelques précautions telles que :
 - Maintenir un débit d'air de combustion minimum de 30% de la pleine charge pendant l'allumage pour prévenir toute accumulation de mélanges explosifs.
 - S'assurer que les vannes d'entrée du combustible sur les brûleurs non utilisés sont étanches lorsqu'elles sont fermées.
 - Porter attention aux feux afin que le combustible puisse être coupé sans délai s'il y a extinction. Purger immédiatement le foyer pendant plusieurs minutes avec le ventilateur maintenu en service, avant de rallumer.
 - En démarrage, si l'allumage n'est pas établi en quelques secondes, purger le foyer, comme indiquer ci-dessus, avant d'essayer à nouveau d'allumer.
 - Ne pas maintenir la pression des combustibles dans le circuit alimentant les brûleurs si cela n'est pas nécessaire.

III.1.5. Fatigue et fragilisation du métal

Les chocs thermiques provoquent des cycles de dilatation restreinte, engendrant des gradients de contraintes qui s'initieront généralement sur les défauts géométriques des surfaces. La fatigue à chaud traduit une évolution en fonction du temps et sous l'effet des contraintes de service qui ont tendance à accélérer des phénomènes de précipitation.

III.1.6. Qualité de l'eau

La qualité de l'eau influe fortement et peut conduire à la destruction des surfaces internes des tubes vaporisateurs. Il est donc impératif de traiter l'eau de la chaudière afin d'éviter le dépôt de tartre à l'extérieur du tube foyer. En effet, le tartre provoquerait un mauvais échange thermique, un temps de mise en pression-température plus long, un risque de surchauffe au niveau du tube foyer, une surconsommation de combustible, une augmentation de la température des fumées au niveau de la cheminée. L'expérience a montré qu'il est nécessaire de maintenir à une

valeur convenable les caractéristiques chimiques de l'eau des différents circuits afin d'éviter :

- La corrosion définie comme étant l'ensemble des processus destructifs que subit un corps solide sous l'action de certains paramètres extérieurs (agent atmosphérique ou produit chimique).
- L'entartrage ou dépôt qui est localisé directement sur les parois externes des tubes de la chaudière. Le tartre joue le rôle d'un isolant thermique au transfert de chaleur. La chaleur s'accumule dans la paroi ce qui engendre des points chauds.

La figure III.2, illustre l'explosion de la chaudière Clark-Chapman type-D du complexe de GNL du Skikda, qui a eu lieu le 20/01/2004 à 18 : 40, et dont les conséquences dramatiques ont été 27 morts et de nombreux blessés. La chaudière a été complètement détruite et fondue.





Figure III.2 : Explosion de la chaudière Clark Chapman à Skikda.

Table 3 : Principaux risques et fréquence d'apparition

Cause des avaries	Type de chaudières				TOTAL	
	A tubes de fumée foyer intérieur	A tubes d'eau	Verticales	A tubes de fumée foyer extérieur	Nombre	%
Manque d'eau	22	11	18	1	52	39
Entartrément	15	4	8	6	33	26
Corrosions interne	9	1	7	2	19	14
Cassures	5		6		11	8
Explosions côté feu		6			6	4,4
Défauts de construction	4	1			5	3,8
Corrosions côté feu	1		1		2	1,6
Allure de chauffe excessive	1				1	0,8
Défaut de circulation		1			1	0,8
Causes diverses	2				2	1,6
TOTAL	59	24	40	9	132	
%	45	18	30	7		100

III.2. Les problèmes typiques sur les réseaux de chauffage

Les réseaux de chauffage, vu leur configuration et de leur température fonctionnement, sont souvent siège de corrosion, d'entartrage ou d'embouage.

L'entartrage est causé par la montée en température : plus elle augmente, moins les minéraux dissouts dans l'eau sont solubles. Les premiers à précipiter sont les carbonates de calcium et de magnésium : le tartre. **Une surconsommation de 10 % peut-être provoqué par un dépôt de tartre de l'épaisseur d'une coquille d'œuf !**

La corrosion a différentes origines, qui interviennent isolément ou conjointement : le caractère oxydant de l'eau et de ses composés, la présence de métaux de différente nature, les soudures, les bactéries, l'existence de dépôts, les phénomènes d'abrasion.

L'embouage est également courant, souvent causé par le manque d'efficacité (ou l'absence) de rinçage avant mise en service des réseaux, la corrosion des métaux, la précipitation de la dureté de l'eau d'appoint ou la présence de bactéries dans les réseaux basse température ou planchers chauffants.



Figure III.3 : Les problèmes typiques sur les réseaux de chauffage

III.2.2. Les paramètres qui influencent les phénomènes d'entartrage, de corrosion, et la formation des boues:

III.2.2.1 Entartrage:

Dureté de l'eau, quantité de minéraux pouvant précipiter. Le titre hydrotimétrique (TH, indicateur de la dureté de l'eau) mesuré en degré français (°f ou °fH). Pour donner un exemple, 30°f représente potentiellement 300g de tartre par m³ d'eau.

Température, plus la température est haute, plus les minéraux précipitent facilement (corps de chauffe chaudière, échangeur PAC...).

Fréquence des appoints, en rajoutant de l'eau neuve, on recharge le circuit en minéraux qui vont à leur tour précipiter.

L'existence préalable de tartre, facilite l'accroche des autres cristaux et donc entraîne la croissance du dépôt.

III.2.2.2 Corrosion:

pH, si le pH est trop acide, l'eau corrode les métaux, à l'inverse s'il est trop basique, elle dissout l'aluminium et le cuivre jusqu'au percement.

Constituants de l'eau, oxygène dissout, eau chargée en sulfates et/ou chlorures, ou à l'inverse eau peu minéralisée, présence de traitement de détartrage mal rincés ...

Bactéries sulfato-réductrices ou ferrobactéries, leur métabolisme acidifie l'eau.

Piles galvaniques, la présence de métaux de nature différente entraîne la formation de potentiels électriques qui aboutissent à des percements.

III.2.2.3 Formation des boues, embouage:

Absence ou inefficacité du rinçage avant mise en service, dissolution des calamines, entraînement des résidus de chantier (graisses, fibres, limailles et brassures ...)

Développement de bactéries, favorisé en réseau basse température, réseau microporeux à l'air composites: accrochage du biofilm facilité, absence de désinfection avant mise en service d'un plancher chauffant.

Corrosion active ou ancienne, débris d'oxydes entraînés par l'eau ou déposés en points bas, dans les zones à faible vitesse de passage.

Entartrage, le tartre, à basse température ou fortes vitesses de circulation formera des boues (eau troubles) qui se déposent en point bas.

III.2.3. Les opérations curatives

Quand le mal est déjà fait, il n'est pas forcément trop tard pour agir!

III.2.3.1 Lutter contre l'entartrage

- **Objectif:** retirer le calcaire formé sans agresser les métaux
Détartrage :
 - dissolution des dépôts à l'aide d'acide passivé ou additionné d'inhibiteur de corrosion
 - neutralisation et/ou rinçage et vidange
 - passivation des surfaces

III.2.3.2 Lutter contre la corrosion

Objectif: retrouver un bon état de surface et évacuer les oxydes

Désoxydation:

- décollement des oxydes (acides forts, dispersants)
- neutralisation, vidange et rinçage
- passivation

III.2.3.3 Eliminer les boues

Objectifs : évacuer les boues et dépôts

Désembouage :

- dissolution des dépôts à l'aide de dispersants spécifiques et acides doux
- vidange et rinçage
- passivation

III.2.3.4 Eviter la prolifération bactérienne

Objectif: détruire les bactéries et évacuer le biofilm

Décontamination / désembouage :

- fragilisation et dispersion du biofilm (traitement basique et/ou dispersant)
- désinfection du réseau (biocides, désinfectants, agents bactériostatiques)

III.2.3.5 Eviter la récurrence

Reprendre les non-conformités éventuelles du réseau

Mettre en place les traitements de l'eau préventifs adaptés

Surveiller les appoints d'eau irréguliers (voir Solutions GLOBAL-VISIO).

III.2.4. Bonnes pratiques

III.2.4.1 Réglementation:

Il n'existe pas de texte réglementaire précis traitant le sujet.

III.2.4.2 Texte de référence:

Conditions générales de garanties des fabricants. (Accords intersyndicaux du SNEC, préconisation constructeur, DTU chauffage).

III.2.4.3 Contrat d'exploitation:

Le prestataire doit de façon implicite maintenir l'installation en bon état. En tant qu'exploitant il faut :

- Avoir les connaissances des bonnes pratiques du métier
- Le cas échéant sous-traiter ou s'orienter vers un spécialiste.

III.2.4.4 Le procès verbal de réception du réseau:

Lors de la prise en charge d'un site il est nécessaire de rédiger un PV de réception et pour cela il faut :

- Une analyse physico-chimique complète de l'eau (eau du réseau + eau brute alimentant le site)
- Procéder à une analyse visuelle de l'état général de l'installation
- Etablir un relevé des non-conformités éventuelles
- Etablir un relevé des matériaux en présence... voir incompatibilité éventuelle...
- Procéder au démontage de l'éventuelle manchette témoin
- Consulter ou créer le carnet de chaufferie

III.2.4.5 Application d'une procédure spécifique:

Suivant le procès verbal, l'exploitant est tenu d'informer le client des risques potentiels d'une opération de désembuage.

La compréhension et l'approbation du client se fait par la signature du procès verbal.

Chapitre IV : La vapeur à basse, moyenne et haute pression.

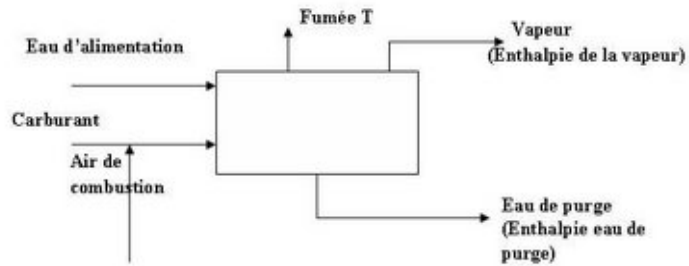


Figure I-1. Bilan énergétique d'une chaudière à vapeur

I.2. Rendement de la Combustion :

Les analyses des gaz de combustion permettent de mesurer le rendement de la combustion dans une chaudière.

Le rendement de combustion est calculée selon le type de combustible, la température ambiante, la température de fumée, la concentration en oxygène dans la fumée ou l'excès d'air.

Le rendement de combustion exprime la partie de la chaleur dégagée par la combustion et absorbée par l'eau de chaudière

Les pertes de combustion sont les calories ou joules qui partent avec la fumée, puisque la fumée part à une température supérieure à la température ambiante

On note que l'excès d'air est une source principale des pertes de combustion, puisqu'on fait entrer de l'air frais dans le foyer de la chaudière et on le fait sortir à la température de fumée

I.3. perte énergétique avec les purges de déconcentration :

a)- Calcul du débit d'eau de purge d'une chaudière :

On rappelle que les purges de déconcentration d'une chaudière permettent de maintenir une concentration de sels totaux inférieure au seuil de saturation, pour éviter la cristallisation des sels sur les tubes de la chaudière.

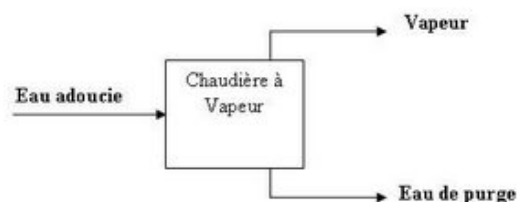


Figure I-2. Bilan matière d'une chaudière à vapeur

Les vapeurs sont supposés exempts de sel

Pour un calcul rapide, on estime que la conductivité d'eau est proportionnelle à la salinité pour un même mélange de sels.

Toute la masse des sels qui entre avec l'eau d'alimentation de chaudière sort avec les eaux de purge (conservation de masse) (Le débit d'eau d'alimentation) * (la conductivité d'eau d'alimentation) = (le débit d'eau de purge) * (conductivité d'eau de purge)

Le débit d'eau de purge = débit de vapeur * (concentration en sel d'eau d'alimentation) / (concentration en sel d'eau d'alimentation + concentration en sel d'eau de purge)

En pratique on utilise des conductimètres pour contrôler les eaux des chaudières

La formule devient ;

Débit d'eau de purge = débit de vapeur * (conductivité d'eau d'alimentation / (conductivité d'eau de purge + conductivité d'eau d'alimentation))

Si une eau d'alimentation de chaudière a une conductivité de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$

La conductivité maximale d'eau de purge est de 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Le débit de purge est de $1/7$ * débit de vapeur de la chaudière

b)- Pertes énergétiques avec les eaux de purge d'une chaudière

Selon la pression de vapeur il faut calculer la température d'eau de purge, cette température est la même que celle de vapeur (voir tableau ou diagramme d'eau et vapeur saturée)

Pour cette même eau on calcule son enthalpie (voir diagramme d'eau saturée)

Les pertes énergétiques par l'eau de purge = Débit d'eau de purge * enthalpie d'eau de purge

I.4. Energie provenant de la combustion

Chaque type de combustion a un pouvoir calorifique propre pouvoir calorifique

- Le pouvoir calorifique du GPL est environ 45 MJ/kg
- Le pouvoir calorifique du fioul lourd est environ 42 MJ/kg
- Le pouvoir calorifique du gaz naturel est environ 35 à 40 MJ/m³

L'énergie fournie par le brûleur est = Débit du carburant * pouvoir calorifique du carburant

I.5. Energie qui part avec la vapeur

L'énergie qui part avec la vapeur = débit de vapeur * enthalpie de la vapeur

L'enthalpie de vapeur se calcule à partir du tableau ou du diagramme de la vapeur saturée (on sait la pression de la chaudière)

I.6. bilan thermique chaudière

D'après le principe de conservation d'énergie nous avons :

L'énergie provenant du combustible (quantité de combustible * pouvoir calorifique du combustible) + énergie d'eau d'alimentation (enthalpie d'eau à la température d'alimentation de chaudière * débit d'eau d'alimentation de chaudière) = énergie de la vapeur sortante de chaudière (débit vapeur * enthalpie vapeur) + (énergie eau de purge (débit d'eau de purge * enthalpie d'eau de purge) + perte de combustion (énergie provenant de la combustion * (1-rendement de la combustion)

Chapitre II : Les différents types de chaudières

I.1.1. Puissance utile (produite)

I.1.1.1. Puissance (ou chaleur) utile principale

C'est l'énergie transmise aux fluides chauffés par unité de temps, c'est-à-dire la différence entre l'énergie exportée vers l'utilisation (turbine ou réseau) et celle retournée à la chaudière par les fluides à chauffer.

Le fluide chauffé peut être à des états ou à des niveaux de pression différents ; on peut avoir ainsi pour une même chaudière (figure I-1) :

— un débit de vapeur surchauffée provenant principalement d'un débit d'eau d'alimentation à une certaine température, et complété par un débit d'eau d'injection (utilisé pour la régulation de la température de surchauffe) à une température différente de celle de l'eau d'alimentation.

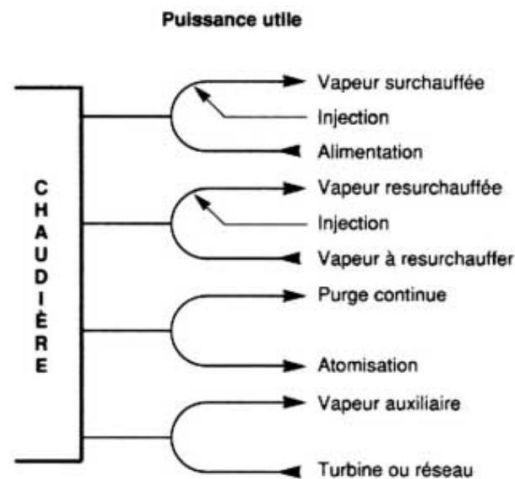


Figure I-1. Décomposition de la puissance utile

La chaleur transmise à l'eau d'alimentation a permis de la porter à ébullition, de la transformer en vapeur saturée et de surchauffer cette vapeur saturée jusqu'à la température désirée à la sortie du surchauffeur.

L'échauffement, la vaporisation et la surchauffe de l'eau injectée pour moduler une température de vapeur s'effectuent par mélange avec de la vapeur surchauffée, en empruntant la chaleur acquise antérieurement par celle-ci ;

- un débit de vapeur resurchauffée provenant d'un étage intermédiaire de soutirage de la turbine à vapeur, éventuellement complété par son débit d'injection ; la chaleur transmise à la vapeur à resurchauffer provenant de la turbine sert à élever sa température, sans changement de phase ;
- éventuellement, une deuxième resurchauffe ;
- parfois, mais très exceptionnellement, quand il s'agit de chaudière de grande puissance, un réchauffage de fluide autre que l'eau (par exemple intégré dans un processus d'usine chimique).

La puissance utile est calculée par la formule :

$$Q_u = \sum m_s H_s - \sum m_i H_i \quad \text{en (kW)}$$

avec

H_i (kJ/kg) enthalpie du fluide entrant,

H_s (kJ/kg) enthalpie du fluide sortant,

m_i (kg/s) débit entrant,

m_s (kg/s) débit sortant,

Le tableau I-1 donne un exemple d'évaluation de puissance utile pour une chaudière de 975 t/h.

Tableau 1 – Evaluation de la puissance utile pour une chaudière de 975 t/h

Définition de l'allure maximale continue		100 %
Données de départ	Température (°C)	
	Eau d'alimentation.....	262,069
	Saturation.....	361,565
	Sortie surchauffeur.....	542,397
	Entrée resurchauffeur.....	342,578
	Sortie resurchauffeur	540,606
	Pression..... (bar)	
	D'alimentation.....	217,250
	Au réservoir.....	190,300
	De sortie surchauffeur.....	183,100
	D'entrée resurchauffeur	45,843
	De sortie resurchauffeur	43,803
Bilan thermique	Débit massique (kg/s)	
	D'alimentation.....	270,912
	De sortie surchauffeur.....	270,912
	De sortie resurchauffeur	240,237
	Enthalpie massique (kJ/kg)	
	Alimentation.....	1 144,050
	Eau bouillante	1 779,771
	Vapeur saturée	2 469,216
	Sortie surchauffeur.....	3 391,180
	Entrée resurchauffeur.....	3 059,990
	Sortie resurchauffeur	3 532,910
	D'injection en resurchauffe.....	787,710
	Puissance contenue..... (kW)	
	Alimentation.....	309 936,813
	Eau bouillante	482 161,188
	Vapeur saturée	668 940,250
	Sortie surchauffeur.....	918 711,250
	Entrée resurchauffeur.....	735 122,750
	Sortie resurchauffeur	848 735,625
	Puissance nécessaire (kW)	
	Échauffement de l'eau.....	172 224,375
	Vaporisation	186 779,062
	Surchauffe	249 771,000
	Resurchauffe	113 612,875
	Puissance utile (kW)	722 387,313

I.1.1.2. Puissance utile annexe

Il s'agit, par exemple :

- de la puissance exportée pour le réchauffage du combustible et sa pulvérisation, qui peut être soit perdue (réchauffage de bacs extérieurs), soit réintroduite dans le système (dans ce cas, cette puissance sera de nouveau comptée comme telle) ;
- de la puissance exportée sous forme de purge continue (ou périodique).

I.1.2. Puissances introduites

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

Leur évaluation directe résulte de l'équation :

$$\text{puissances introduites} = \frac{\text{puissance utile}}{\text{rendement}}$$

La notion de rendement, d'apparence trompeusement simple, n'est précise qu'à condition de lui associer :

- une indication complémentaire vis-à-vis du pouvoir calorifique du combustible, base PCS (supérieur) ou PCI (inférieur) ;
- le choix de la température de référence (l'énergie fournie sous forme de combustible et la chaleur de l'air introduit pour la combustion ne peuvent s'estimer qu'à partir d'une température choisie a priori, 0°C, température ambiante ou autre, à définir sous le nom de température de référence) ;
- le choix d'un code de présentation du calcul final du rendement ; en effet, suivant les pays ou les usages, certaines valeurs de pertes ou d'apports de chaleur auxiliaire interviennent de façon différente dans les bilans.

Mais pour aborder les calculs, il est indispensable d'analyser plus en détail les éléments du bilan (figure I-2) à partir de l'équation :

$$\text{puissances introduites} = \text{puissance utile} + \text{pertes}$$

La puissance introduite par le combustible est proportionnelle au débit de combustible brûlé. La réaction de combustion n'est pas toujours complète ; suivant l'excès d'air utilisé, la qualité des brûleurs ou des systèmes de combustion, la taille du foyer ou la préparation du combustible, une partie de celui-ci ne brûle pas. Les imbrûlés sont généralement en très faible quantité pour les combustibles gazeux ou liquides, mais peuvent atteindre 1 % ou plus pour des combustibles solides.

Par définition, on considère comme puissance introduite par le combustible celle qui résulterait de la combustion complète de la totalité du combustible préparé et introduit dans le système, avec son pouvoir calorifique normal, ce qui équivaut à compter comme pertes la chaleur qui aurait été produite par la combustion de ces imbrûlés.

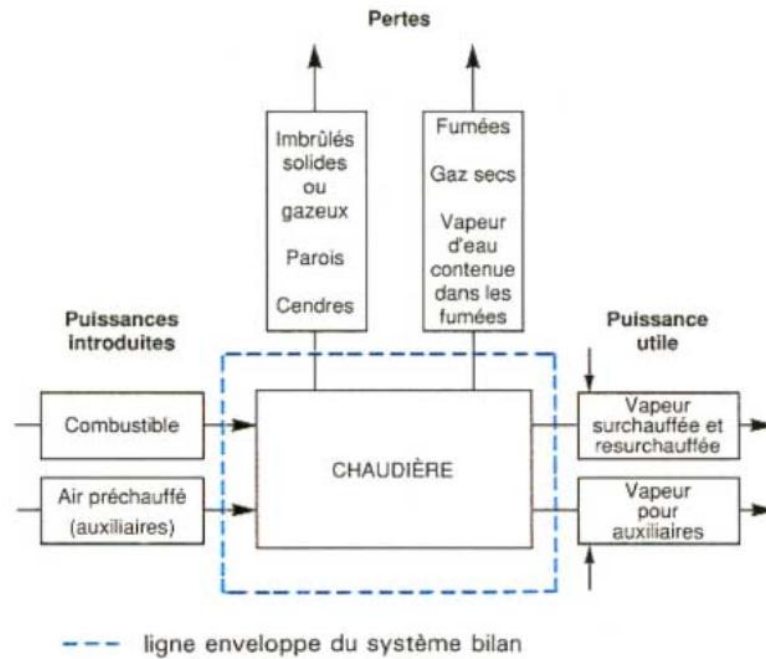


Figure I-2. Bilan d'énergie du système chaudière

Mais l'expression de la puissance introduite (ainsi que celle des pertes correspondant à la combustion) est liée au choix retenu pour la définition du pouvoir calorifique du combustible.

Il faut également évoquer les notions d'enthalpie de formation (chaleur latente) et d'enthalpie sensible (chaleur sensible).

I.1.2.1. Enthalpie de formation du combustible

La production de chaleur résulte de la combustion, c'est-à-dire d'une réaction chimique entre un combustible et de l'air pris à l'extérieur.

La chaleur produite par la combustion d'une quantité unitaire (kg ou Nm³ de combustible) est mesurée en laboratoire à la bombe calorimétrique à partir d'une faible quantité d'un échantillon de ce combustible que l'on fait brûler en présence d'un excès d'oxygène ; la masse de produits, initialement à 0 °C, est ramenée à cette même température après combustion. La quantité de chaleur mesurée par ce procédé, désignée par PCS pouvoir calorifique supérieur, prend en compte la chaleur de condensation de la vapeur d'eau produite ; cette vapeur d'eau provient soit de l'eau superficielle du combustible, soit de celle de constitution ou de celle des hydrates, et de l'hydrogène.

I.1.2.2. Enthalpie sensible du combustible

Le combustible est en général à la température ambiante (combustible solide ou gaz naturel), température qui peut être un peu différente de celle de référence ; en toute rigueur, il faut tenir compte de cet écart.

Les combustibles liquides, et principalement les fuels lourds, doivent être chauffés pour que leurs viscosités soient telles que l'on obtienne une pulvérisation suffisamment fine pour assurer une bonne combustion ; parfois, la pulvérisation est obtenue directement par de la vapeur. Certains combustibles gazeux tels que le gaz CO sortant de réacteurs, certains gaz de processus ou de hauts-fourneaux non stockés arrivent aux brûleurs à haute température (400 à 600 °C). Dans les chaudières de récupération (derrière la turbine à gaz, par exemple), le seul apport de chaleur provient de l'enthalpie sensible du mélange gazeux introduit.

Cet apport de chaleur, proportionnel au combustible introduit, intervient dans le bilan, mais d'une façon différente suivant la provenance de l'énergie de réchauffage, qui peut être externe à la chaudière ou prélevée directement sur sa chaleur interne. C'est l'un des cas où il est important, pour la clarté de la présentation d'un bilan.

I.1.2.3 Puissance introduite par l'air dans la chaudière sous forme d'enthalpie sensible

Elle n'est à prendre en compte que lorsque la chaleur a été fournie par une source extérieure au système.

C'est le cas lorsque l'on préchauffe l'air, avant son introduction dans le réchauffeur d'air, soit pour la protection contre la corrosion des zones basse température du réchauffeur d'air, soit pour assurer une meilleure combustion (air extérieur soufflé sous les grilles d'une chaudière à charbon).

L'énergie apportée par le ventilateur de soufflage est également à prendre en compte sous forme de crédit de chaleur s'il est défini que la température de référence est prise à son aspiration ; par contre, si la température de référence est définie en aval, ce crédit n'existe plus.

Il y a ambiguïté – à éliminer lorsque l'on veut comparer des solutions concurrentes – quand la température de référence est placée en amont des réchauffeurs d'air, suivant qu'il y a des préchauffeurs ou non, et suivant qu'ils sont considérés comme étant en service ou non.

La plupart des codes de détermination du rendement lèvent cette ambiguïté mais pas tous, d'où la nécessité d'être précis et vigilant sur ce point.

I.1.2.4 Puissances auxiliaires introduites sous forme mécanique

Ce sont toutes celles dues à des systèmes de transport internes à la chaudière entraînés par une énergie d'origine extérieure, électrique en général, parfois sous forme de vapeur en provenance du réseau ou de la turbine. Sont impliqués les pompes de circulation, ventilateurs de recyclage, ventilateurs associés au broyage, broyeurs, pompes d'injection de fuel, etc.

Le cas du ventilateur de soufflage a été examiné au paragraphe I.1.2.3. Par contre, le ventilateur de tirage, situé en aval du système, n'intervient pas dans le bilan, la température des fumées à partir de laquelle sont calculées les pertes étant prise immédiatement en aval du dernier échangeur.

I.1.3. Pertes

Les codes de détermination de rendement énumèrent plus d'une dizaine de pertes, car ils examinent en détail celles créées par chacun des composants des fumées.

Sans aller si loin, pour juger du fonctionnement économique d'une chaudière, il faut distinguer les points suivants (figure I-2).

I.1.3.1. Perte par enthalpie sensible des fumées

Elle est proportionnelle à la masse des fumées sortant du système et à l'écart entre la température des fumées à la sortie de la chaudière et la température de référence (essais officiels de rendement) ou la température extérieure (exploitation normale).

Il faut un dérèglement important pour qu'une part de combustible ne brûle pas du tout (jet de mazout ou de gaz en provenance d'un brûleur non allumé) ; par contre, dans des flammes de combustible liquide ou gazeux, un léger dérèglement de l'air apporté localement au brûleur est générateur d'imbrûlés soit sous forme de carbone (noir de fumées, fréquent surtout en période d'allumage en zone froide), soit sous forme de monoxyde de carbone, indice d'une combustion incomplète par insuffisance d'oxygène.

La mesure des pertes par imbrûlés gazeux se fait par analyse des fumées ; celle des imbrûlés solides par évaluation de la quantité de carbone recueillie dans les cendres.

I.1.3.3. Pertes par les parois : rayonnement et convection externe

Compte tenu de la difficulté de leur estimation précise et de leur faiblesse relative vis-à-vis des autres pertes (pour les chaudières d'une puissance supérieure à 50 t/h), il a été convenu de les évaluer forfaitairement.

Ces pertes sont faibles puisque :

- pour des raisons de protection du personnel, il est souvent imposé une température limite de la tôle externe qui recouvre le calorifuge ;
- l'épaisseur courante de calorifuge, comprise entre 50 et 100 mm, intervient relativement peu dans le prix en tant que fourniture, la majorité du coût étant due au dispositif d'accrochage, à la pose et à la fourniture de la protection externe ; le surcoût, pour obtenir une température de tôle convenable, n'est pas très élevé ;

- pour les chaudières intégrées dans un bâtiment, une partie de la chaleur cédée par les parois externes est récupérée par l'aspiration des ventilateurs de soufflage, qui participent au conditionnement de la zone supérieure de la chaufferie.

Ces pertes par rayonnement et convection externe, proportionnelles à l'enveloppe extérieure de la chaudière, diminuent en valeur relative quand la puissance de la chaudière s'accroît.

Pour une chaudière donnée, elles restent constantes en valeur absolue, indépendamment de l'allure, puisque la température des parois (écrans tubés) ne varie pratiquement pas.

I.1.4 Débit de combustible à brûler à une allure donnée

La détermination de ce débit résulte de l'équilibre du bilan tel que présenté ci-avant, ou plus directement, du calcul des pertes liées à l'utilisation de chaque unité de combustible (kg de charbon ou de fuel, Nm^3 de gaz, etc.) dans les conditions de fonctionnement prévues et de la détermination de la chaleur nette transférable à la production de vapeur (le pouvoir calorifique moins les pertes unitaires).

Le rapport entre la puissance utile totale et cette chaleur unitaire transférable détermine le débit de combustible.

De la connaissance du débit de combustible résulte la possibilité de calculer les débits d'air et de fumes.

I.2. Bilan matière

Les opérations à effectuer portent successivement sur la détermination d'éléments relatifs à **une unité de combustible** (kg de charbon ou de fuel, Nm^3 de gaz) : débits unitaires d'air et de fumées, puis sur la détermination globale.

On commence par le choix de l'excès d'air minimum pour obtenir une bonne combustion.

- Détermination, à partir de l'analyse élémentaire des réactions chimiques de combustion, de la quantité d'oxygène nécessaire à celle-ci et de la quantité d'air associé y compris l'excès d'air, donc du *pouvoir comburivore*.

L'air atmosphérique étant humide, il y a lieu de se fixer son degré hygrométrique ou sa teneur en vapeur d'eau, en fonction de la température de référence choisie.

- Détermination de la masse, du volume et de la composition des fumées produites par la combustion de cette unité de combustible, donc du *pouvoir fumigène*.

Les réactions admises sont celles de l'oxydation totale, sauf pour le soufre qu'on limite à la production de SO_2 (et non pas de SO_3).

Sur le plan de la chimie, la combustion, réaction d'oxydation, peut se représenter par le diagramme de la figure I-3 :

- à partir de la composition des fumées, détermination de leur capacité thermique massique ou volumique ;
- après le choix de la température des fumées à la cheminée, calcul de la perte par enthalpie sensible des fumées ;
- cumul de cette perte avec celles estimées (en %) pour les imbrûlés, par convection et rayonnement externe ;
- estimation des crédits de chaleur (en %).

Après addition des crédits de chaleur et soustraction des diverses pertes, on obtient la puissance unitaire disponible.

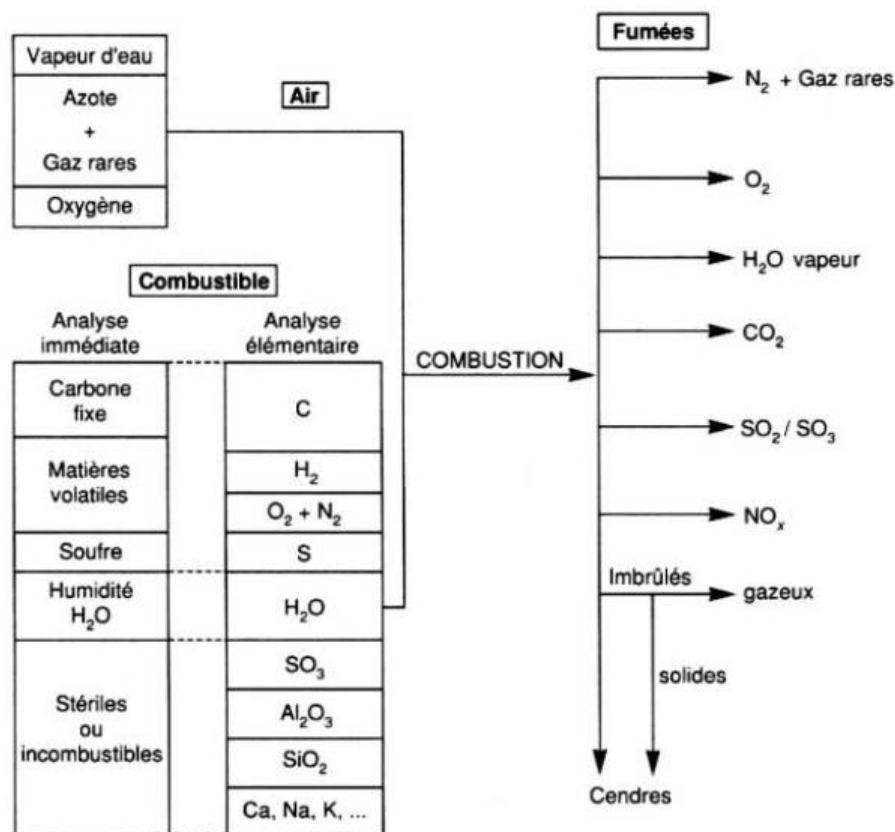


Figure I-3. Diagramme de la combustion

I.2.1 Débit de combustible

Compte tenu du bilan des énergies, on peut déduire la quantité de combustible à introduire, dans lequel il faut distinguer :

- la part imbrûlée qui va s'ajouter aux cendres ;
- la part brûlée qui va permettre de calculer le tonnage total de fumées produites et le tonnage d'air nécessaire.

Remarques

- L'analyse élémentaire est un point de départ commode pour le calcul du débit d'air, de fumées, et la composition de celles-ci. Mais la validité de cette analyse dépend des précautions prises pour l'échantillonnage et du sérieux du laboratoire ; une précaution essentielle est de reconstituer le pouvoir calorifique à partir de l'analyse et de comparer le résultat au pouvoir calorifique affiché ; il existe des formules empiriques (formules de Boie, par exemple), dont les résultats sont valables à 2 ou 3 % près, qui permettent de calculer des pouvoirs calorifiques à partir de l'analyse immédiate.
- La teneur en O_2 du combustible est souvent obtenue par différence entre l'échantillon avant analyse, les produits qui ont disparu par combustion, et les cendres. Or :
 - la masse des cendres diffère de la masse des inertes de l'échantillon initial (disparition du CO_2 des carbonates et disparition de H_2O de certains hydrates, mais oxydation de certains composants) ;
 - cette différence, déjà sujette à erreur, englobe O_2 et N_2 , dont la distinction sur le résidu gazeux éventuellement recueilli n'est pas précise.

Comme l'oxygène du combustible intervient dans la combustion et réduit la quantité d'air extérieur nécessaire, un écart de 1 point sur la teneur en O_2 du combustible se traduit par un écart d'environ 5 points sur la quantité d'air nécessaire.

I.2.2. Débits d'air et de fumées

Ce sont les produits du débit de combustible brûlé par le pouvoir comburivore (débit d'air) et le pouvoir fumigène (débit de fumées) ; il s'agit bien entendu de débits totaux, pour un excès d'air déterminé.

I.2.2.1. Répartition du débit d'air

- Air primaire vers le circuit de broyage dans le cas du charbon, puis vers la zone centrale des brûleurs, en contact direct avec le combustible dans la zone d'allumage.
- Air secondaire nécessaire pour la combustion correcte.
- Par fois, air tertiaire, complément pour la combustion complète, mais en retrait de la zone de feu pour limiter les oxydes d'azote.

Les réchauffeurs d'air par les fumées sont :

- soit du type échangeurs à surface étanche, sans contact direct entre air et fumées ;
- soit du type régénératif, réalisé par des ensembles de tôles minces balayées alternativement par des fumées et de l'air ; il y a alors une fuite d'air vers les fumées, de l'ordre de 5 à 10 % du débit d'air.

I.2.2.2. Répartition du débit de fumées

Les fumées produites par la combustion dans le foyer traversent ensuite les échangeurs, où elles sont refroidies avant de sortir à la cheminée, le plus souvent extraites par un ventilateur de tirage.

Elles peuvent être divisées dans leur parcours à travers les échangeurs pour permettre de favoriser, en fonction de l'allure, un circuit de vapeur – resurchauffe par exemple.

Elles peuvent être également reprises dans une zone à température moyenne 350/450 °C, généralement en aval de l'économiseur et en amont du réchauffeur d'air, pour être réinjectées dans le foyer. C'est le recyclage, qui a des effets :

- sur la combustion et la température dans le foyer ;
- sur les échangeurs : réduction de la température des fumées en amont, augmentation en aval, augmentation des vitesses et des coefficients d'échange ;
- sur le réglage de la resurchauffe à basse allure par modification du débit de fumées, qui ne reste plus proportionnel à l'allure de la chaudière.

Ce débit de fumées recyclées varie, suivant les conceptions, entre 20 % et 40 % du débit normal à la pleine charge.

Le recyclage s'effectue grâce à un ventilateur traversé par des gaz à 400/450°C ; il est courant pour des chaudières à fuel ou à gaz, plus rare pour du charbon, à cause de l'érosion provoquée par les cendres.