

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	5
CHAPITRE 1 : Technologie et type des chaudières	7
1.1. Types de chaudières	7
1.2. Classification des chaudières.....	7
1.2.1. Selon le mode d'emploi.....	7
1.2.2. Selon la disposition générale	7
1.2.3. Selon le mode de construction	7
1.2.4. Selon le mode chauffage	8
1.2.5. Selon la nature de la vapeur produite	8
1.2.6. Selon la vitesse de circulation de l'eau	8
1.3. Technologie des chaudières	9
1.3.1. Chaudières en fonte.....	9
1.3.2. Chaudières en acier	9
1.4. Constitution globale des chaudières	9
1.4.1. Le foyer d'une chaudière.....	10
1.4.2. Les grilles	10
1.4.3. Les tubes d'eau	10
1.4.4. Les tubes de fumées	10
1.4.5. Les bouilleurs	10
1.4.6. Les surchauffeurs et resurchauffeurs.....	11
1.4.7. Les économiseurs.....	12
1.4.8. Les réchauffeurs d'air	12
1.5. Principaux circuits d'une chaudière et les facteurs influençant leur fonctionnement.....	13
1.6. Circulation dans une chaudière	14
1.6.1. La circulation naturelle.....	14
1.6.2. La circulation contrôlée.....	16
1.6.3. La circulation forcée	17
1.7. Les chaudières à eau chaude	18
1.7.1. La chaudière de production d'eau chaude à foyer borgne.....	18

1.7.1.1.	Présentation	18
1.7.1.2.	Principe.....	19
1.7.2.	Chaudière de production d'eau chaude à foyer borgne à haut rendement	20
1.7.3.	Chaudière à eau chaude à 3 parcours en ligne.....	20
1.7.4.	Chaudière eau chaude 3 parcours à condensation	21
1.7.5.	Chaudière eau chaude avec batterie de condensation	22
1.7.6.	Chaudière à condensation pour extérieur	22
1.7.7.	Chaudière à eau chaude sanitaire et production eau chaude industrielle à condensation .	23
1.7.7.1.	Les applications	23
1.7.7.2.	La conception générale.....	Erreur ! Signet non défini.
1.7.7.3.	Le descriptif technique	24
1.7.7.4.	Les avantages.....	24
1.8.	Les chaudières à vapeur	25
1.8.1.	Chaudières à tubes de fumées.....	25
1.8.2.	Les chaudières à tubes d'eau	30
CHAPITRE 2 : Combustibles et leurs caractéristiques physicochimiques		34
2.1.	Les combustibles	34
2.1.1.	Les combustibles solides	34
2.1.1.1.	Les foyers mécaniques	35
2.1.1.1.1.	Les foyers à vis ou à pistons.....	35
2.1.1.1.2.	Les foyers à grilles mécaniques.....	35
2.1.1.2.	Les foyers à brûleurs	35
2.1.2.	Les combustibles liquides.....	37
2.1.2.1.	La pulvérisation par la vapeur.....	37
2.1.2.2.	La pulvérisation par l'air	37
2.1.2.3.	La pulvérisation mécanique	37
2.1.3.	Les combustibles gazeux	38
2.1.4.	Influence du combustible sur les chaudières	38
2.2.	Caractéristiques physicochimiques des combustibles.....	39
2.2.1.	Le pouvoir calorifique.....	39

2.2.1.1.	Détermination du pouvoir calorifique par calcul	40
2.2.1.2.	Détermination du pouvoir calorifique par la méthode calorifique	42
2.2.1.3.	Procédure de la mesure.....	43
2.2.2.	Le pouvoir calorifique net PCN.....	43
2.2.3.	Le pouvoir comburivore d'un combustible : A_0	44
2.2.4.	Le pouvoir fumigène d'un combustible P_r	44
2.2.4.1.	Pour un combustible solide ou liquide	44
2.2.4.2.	Pour un combustible gazeux	45
CHAPITRE 3 : La combustion dans les chaudières		46
3.1.	Equation de combustion.....	47
3.2.	Les conditions requises pour la combustion.....	47
3.3.	Les besoins de la combustion.....	48
3.4.	Les produits de la combustion	49
3.5.	Les dangers de la combustion	49
3.6.	Température théorique de combustion (T_h).....	Erreur ! Signet non défini.
3.7.	Température réelle ou pratique de combustion (T_r).....	Erreur ! Signet non défini.
3.8.	La température adiabatique de combustion.....	Erreur ! Signet non défini.
3.9.	La température à la sortie du foyer	Erreur ! Signet non défini.
3.10.	Chaleur sensible des fumées.....	Erreur ! Signet non défini.
3.11.	Les températures usuelles	Erreur ! Signet non défini.
3.12.	Le flux thermique rayonnant	Erreur ! Signet non défini.
3.13.	Le contrôle de la combustion	49
3.14.	Efficacité de la combustion	50
3.15.	Le réglage de la combustion.....	50
CHAPITRE 4 : Bilan thermique dans les chaudières		53
4.1.	Principe du bilan thermique	53
4.2.	Le rendement des chaudières	55
4.2.1.	Méthode directe	55
4.2.2.	Méthode indirecte	55
4.3.	Exploitation des chaudières.....	56

CHAPITRE 5 : Eau d'alimentation des chaudières	57
5.1. Quelques définitions	58
5.2. Origines des dépôts dans les eaux d'alimentation	58
5.3. Caractéristiques de l'eau et pathologies	59
5.3.1. Caractéristiques de l'eau	59
5.3.2. Pathologies	59
5.3.2.1. Primage.....	59
5.3.2.2. Incrustations.....	60
5.3.2.3. Corrosions.....	60
5.4. Traitement des eaux des chaudières.....	61
5.4.1. Traitement externe	62
5.4.2. Traitement interne	63
5.4.3. Adoucissements sur résines	66
5.4.4. La décarbonatation sur résine	66
5.4.5. Déminéralisation sur résine : le procédé HRW®.....	67
5.4.6. Déminéralisation par osmose inverse.....	68
5.4.7. Dégazage thermique (Dégazeurs BABCOCK WANSON)	68
5.5. Lutte contre la corrosion	68
5.5.1. Par la connaissance des caractéristiques chimiques de l'eau.....	68
5.5.2. Par la connaissance des phénomènes de corrosion	69
5.5.3. Par une action préventive	69
5.6. Lutte contre le primage	69
CONCLUSION GENERALE	72
BIBLIOGRAPHIE.....	73

INTRODUCTION GENERALE

Les productions de vapeur ou d'eau chaude occupent une place prépondérante dans la majeure partie des activités industrielles (alimentaires ou non), hospitalières voire tertiaires. Ce dispositif permettant de chauffer l'eau et de produire de la vapeur si l'eau est chauffée au-delà de la pression atmosphérique est la chaudière. L'énergie thermique peut être produite de diverses manières : soit par combustion, soit par effet Joule avec l'électricité, soit par le nucléaire. Mais pour les applications énergétiques courantes, elle est surtout obtenue par combustion solide, liquide ou gazeuse dans de l'oxygène de l'air en général (ou de l'oxygène pur dans des applications particulières).

La transmission de la chaleur de combustion au fluide caloporteur se fait par rayonnement, conduction, convection dans un appareil complexe appelé « chaudière ».

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.

L'idée d'utiliser la vapeur comme force motrice remonte au 1^{er} siècle après JC avec l'invention de l'éolipile par Héron d'Alexandrie. La chaudière trouve donc son origine qui remonte à la plus haute antiquité.

En effet, depuis que l'homme a découvert le mode de vie qui consiste à faire bouillir ses aliments, il a ainsi amorcé la mise au point d'une chaudière. Mais il a fallu attendre jusqu'à la fin du 17^{ème} siècle pour voir effectivement apparaître la Marmite de Papin, première application réellement industrielle de la chaudière. Elle sera ensuite très tôt suivie de la première tentative d'application de la force motrice de la vapeur à la navigation. Ainsi, les premières machines à vapeur destinées à l'élévation de l'eau on encore à la propulsion des voitures ont fait leur apparition vers le milieu du 18^{ème} siècle. Une réalisation remarquable en France fut alors le fardier en 1769 mis au point par l'Ingénieur militaire CUGNOT ; le fardier est destiné à la traction des pièces d'artilleries. Des améliorations successives, surtout à partir de 1828, vont conduire à la mise au point de la première chaudière tubulaire en Grande Bretagne. Mais auparavant, James Watt, qui se livrait à des études très sérieuses sur la vapeur d'eau, le développement spectaculaire connu dans le domaine des chaudières va inciter à la perfection notamment avec la mise au point et l'application d'autres échangeurs de chaleurs que sont : le surchauffeur et l'économiseur.

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.

Le présent exposé porte sur le thème « ETUDE DES CHAUDIERES A EAU CHAUDE ET A VAPEUR D'EAU : Technologie, Combustibles, et Qualité d'eau d'alimentation ». Il comportera cinq chapitres. Le premier abordera la technologie, la classification et le principe général des chaudières. Le deuxième chapitre parlera des combustibles et leurs caractéristiques physico-chimiques. Le troisième étudiera la combustion dans les chaudières. Le quatrième quand à lui, portera sur le bilan thermique dans les chaudières et enfin le cinquième sur l'eau d'alimentation des chaudières et leur traitement./

Une chaudière est un appareil dans lequel, par apport de chaleur, un fluide caloporteur subit un chauffage et éventuellement un changement d'état (la vaporisation). La chaudière est, en fait, un générateur de vapeur. La vapeur d'eau est obtenue à l'aide de l'eau et de la chaleur dégagée par la combustion des combustibles.

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.

1.1. Types de chaudières

Dans une chaudière, l'eau peut être successivement échauffée (chaudière à eau chaude), simplement vaporisée (chaudière à vapeur saturée) et surchauffée (chaudière à vapeur surchauffée). Ce qui donne une idée globale des types de chaudières en fonction de la vapeur produite.

1.2. Classification des chaudières

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

1.2.1. Selon le mode d'emploi

Selon ce mode on distingue :

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

1.2.2. Selon la disposition générale

On distingue dans ce mode :

- Les chaudières horizontales
- Les chaudières verticales

1.2.3. 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.

C'est ce mode de classification qui est utilisé en pratique. Cependant, il existe d'autres modes de classification qui sont tout aussi employés que celui-ci.

1.2.4. 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.

1.2.5. 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

1.2.6. 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.

Plus techniques sont aussi les modes de reconnaissance et de caractérisation sur le site de la pression installée et de la pression de service. C'est pour cette raison qu'on a défini le « timbre d'une chaudière ».

En effet, selon le décret du 02 Avril 1926, portant réglementation sur les appareils à pression, le « timbre d'une chaudière » est la pression de levée des soupapes de sûreté qui assure la sécurité en cas de dépression accidentelle, lesdites soupapes étant capable d'évacuer à l'atmosphère plus que le plein débit de la chaudière. Le timbre s'exprime donc en bar effectif et sa valeur correspond à la limite d'utilisation obligatoirement marquée en rouge sur le manomètre réglementaire de la chaudière, la couleur rouge de danger étant choisie pour faciliter le contrôle visuel de non dépassement.

1.3. Technologie des chaudières

La construction des chaudières dépend des facteurs suivants :

- La nature du fluide caloporteur (eau chaude, vapeur d'eau saturée, vapeur surchauffée),
- Les conditions de service (état physique : pression et température) ;
- La nature du combustible (solide, liquide, gazeux) ;
- La mise en œuvre du combustible (manuelle, mécanique, brûleurs,...).

Les constructeurs ont développé de très nombreux types de chaudières. Celles-ci subissent d'ailleurs constamment des modifications à la suite des progrès scientifiques et technologiques ; néanmoins, il est possible de classer les chaudières en quelques catégories essentielles. Nous y reviendront plus en détails mais avant, quelques notions s'imposent.

Les chaudières, au point de vue construction peuvent être en fonte ou en acier.

1.3.1. Chaudières en fonte

Les différents éléments d'une chaudière en fonte sont obtenus par moulage à partir d'un modèle. Les chaudières en fonte se rencontrent dans la gamme des petites et moyennes puissances (puissances inférieures à 2000th/h). Ce sont généralement des chaudières à eau chaude. La législation actuelle interdit l'emploi de la fonte pour la réalisation des chaudières à eau surchauffée à plus de 110°C et à vapeur à la pression de 0,50 bars effectif (soit 1,50 bars absolus). Décret du 08 Septembre 1967 n°-67782. La construction de ces chaudières s'effectue par juxtaposition d'un certain nombre d'éléments semblables moulés et assemblés par boulons ou des tiges filetées.

1.3.2. Chaudières en acier

Les chaudières en acier sont obtenues par soudage à partir de tôles et de tubes. Il est alors possible de réaliser les formes les plus diverses. Ces chaudières sont utilisées pour toutes les gammes de puissances. Ce type de construction est indispensable pour les appareils à forte pression contenant de l'eau (à plus de 110°C) ou de la vapeur (à plus de 0,50 bars).

1.4. Constitution globale des chaudières

Les chaudières se composent de diverses surfaces d'échange appelées surfaces de chauffe et de réservoirs. Les surfaces de chauffe comportent plusieurs parties :

- i. Une partie principale où se produit le chauffage (eau chaude et eau surchauffée) ou la vaporisation ;
- ii. Des parties auxiliaires (pas toujours existantes dans les petites chaudières) dans lesquelles se déroulent divers échanges de chaleur tels que :
 - Le réchauffeur d'air de combustion ;

- Le réchauffeur d'eau d'alimentation (économiseur) ;
- Le surchauffeur de vapeur ;
- Et éventuellement, le surchauffeur de vapeur.

1.4.1. Le foyer d'une chaudière

Le foyer est dit intérieur quand il est placé à l'intérieur d'un des corps cylindriques de la chaudière, l'eau se trouvant autour du foyer.

Le foyer est dit extérieur quand les flammes et les fumées se développent à l'extérieur du ou des corps cylindriques constituant la chaudière. L'ensemble est enfermé dans une enceinte en maçonnerie réfractaire munie de chicanes obligeant les gaz de la combustion à balayer la surface extérieure des corps avant de se rendre à la cheminée.

1.4.2. Les grilles

Dans les chaudières chauffées au charbon, les grilles sur lesquelles brûle le charbon, et qui sont caractérisées par leur surface en m², sont de types fixes ou mobiles.

Les grilles fixes sont constituées par de simples barreaux de fonte juxtaposés et reposant sur des sommiers ; ces barreaux laissent entre eux l'espace nécessaire pour le passage de l'air de combustion.

Les grilles mécaniques sont de types variés. Les plus couramment employés affectent la forme d'une sorte de tapis métallique à claire-voie passant sur des rouleaux à axe horizontale.

1.4.3. Les tubes d'eau

Reliant entre elles et certaines parties du corps de la chaudière, ces tubes, remplis en permanence d'eau, sont disposés dans le passage des gaz chauds au-dessus du foyer. Ces tubes peuvent être verticaux, horizontaux ou inclinés. Dans certains types de chaudières, les tubes d'eau constituent un ensemble très important. Ces faisceaux tubulaires, qui contiennent la majeure partie de l'eau de la chaudière, réalisent la *surface de chauffe*. Quant au nombre de tubes de faisceaux, il est considérable et de l'ordre de plusieurs milliers dans les chaudières importantes (chaudières multitubulaires).

1.4.4. Les tubes de fumées

Ces tubes, dudgeonnés sur le fond des corps, sont en contact avec l'eau par leur surface extérieure, et parcourus intérieurement par les gaz chauds.

1.4.5. Les bouilleurs

Ce sont des corps cylindriques annexes de petites dimensions, exposés directement aux flammes et reliés par leurs deux extrémités au moyen de tuyaux courts et de large section au corps principal situé au-dessus. Une chaudière peut comporter 2, 4 ou même 6 bouilleurs.

1.4.6. Les surchauffeurs et resurchauffeurs

Les surchauffeurs et resurchauffeurs sont constitués d'une série de serpentins tubulaires généralement identiques dont l'une des extrémités est raccordée sur un tube de gros diamètre ou collecteur d'entrée de vapeur et l'autre sur un élément semblable ou collecteur de sortie. Suivant la longueur, chaque serpentins comprend un ou plusieurs tubes soudés bout à bout sur bagues. La liaison des tubes sur chaque collecteur se fait par soudure. Le mandrinage n'est réalisable que si l'épaisseur du tube reste assez faible (5mm maxi). Pour une forte épaisseur de tube, il devient impossible de faire pénétrer le métal dans la gorge ménagée dans l'épaisseur du collecteur en vue d'obtenir un complément de tenue et d'étanchéité. La fixation par soudage devient alors obligatoire. Les serpentins sont disposés verticalement ou horizontalement. Dans chacun des cas, suivant les nécessités, des supports sont prévus pour éviter la déformation des éléments. Le choix des matériaux employés est lié à la température de surchauffe :

- Pour des températures inférieures à 425 – 450 °C, les tubes et les collecteurs en acier doux sont utilisables. Le surchauffeur est placé entre les faisceaux tubulaires du générateur après les rangées de tubes soumises au rayonnement direct du foyer ;
- A partir de 450 – 500 °C, il faut recourir à des aciers alliés. Les éléments incorporés (molybdène, chrome et parfois silicium) permettent d'améliorer les qualités de ces aciers. Le molybdène est utilisé en raison de sa qualité à favoriser l'amélioration de la résistance à chaud; le chrome et éventuellement le silicium assurent une meilleure tenue à chaud, ceci étant surtout entraîné par une résistance plus élevée à l'oxydation et la rupture. Quand la température croît, on augmente le pourcentage de chrome. Le surchauffeur est placé immédiatement à la sortie de la chambre de combustion.

Lors du fonctionnement de la chaudière, une élévation de la température de surchauffe peut être constatée. Pour protéger les serpentins du surchauffeur, les conduites et les premiers étages du groupe turboalternateur, on utilise un dispositif de régulation de surchauffe. Les resurchauffeurs sont situés après les surchauffeurs. Leurs surfaces d'échange n'est pas aussi étendues que celle des surchauffeurs. Cela s'explique par le fait qu'ils reçoivent de la vapeur encore surchauffée tandis que les surchauffeurs reçoivent de la vapeur saturée. Mais comme le volume massique de la vapeur resurchauffée est plus élevé, les capacités des resurchauffeurs sont plus importantes. Le plus souvent, la température de resurchauffe a la même valeur que celle de la surchauffe. Elle peut toutefois être inférieure. Lorsque la pression de marche excède la pression critique, il peut y avoir une double surchauffe.

1.4.7. Les économiseurs

Placés sur le circuit des fumées, immédiatement après les derniers faisceaux du générateur dans les chaudières moyennes, à la suite des surchauffeurs et resurchauffeurs dans les installations de grandes puissances, les économiseurs peuvent être en fonte ou en acier. Ils sont constitués de tubes dont le nombre et la longueur varient selon :

- Le volume des fumées ;
- Les températures d'entrée et de sortie des fumées ;
- Les températures d'entrée et de sortie de l'eau d'alimentation ;
- L'espace dont on dispose à l'intérieur de la chaudière ou à l'extérieur.

Les économiseurs entièrement en fonte sont autorisés si le diamètre intérieur des tubes n'excède pas 100mm. Ce sont des tubes avec ailettes lorsqu'ils peuvent être isolés de la chaudière par une vanne, une soupape de sûreté est obligatoire. La limite d'emploi des appareils en fonte est déterminée d'après la résistance de la qualité de fonte utilisée. C'est le constructeur de l'appareil qui le définit. A partir d'une certaine pression, l'emploi exclusif de la fonte n'est plus possible. Un matériau mixte est alors utilisé. Les tubes sont alors en acier entourés de manchons en fonte portant des ailettes à chaud sur la paroi des tubes. L'avantage de la fonte qui consiste dans sa meilleure tenue à l'usure et à l'oxydation est conservé. Les éléments en acier sont raccordés à chaque extrémité, soit par des coudes en acier fixés par des brides boulonnées, soit par soudage suivant la pression de fonctionnement des appareils. Dans certains économiseurs, les tubes sont acier avec des ailettes en acier lorsque les produits de la combustion ne sont pas de nature à provoquer une usure ou une attaque plus ou moins rapide des ailettes. Les tubes peuvent être seulement en acier à paroi lisse. Les économiseurs peuvent être à tubes horizontaux ou verticaux.

1.4.8. Les réchauffeurs d'air

Les réchauffeurs d'air placés après les économiseurs reçoivent les fumées à des températures variant de 350 – 400°C. Ils sont constitués :

- de plaques parallèles (3 à 20mm d'écartement) entre lesquelles circulent alternativement l'air et les gaz ;
- ou des faisceaux dudgeonnés ou soudés dans deux plaques tubulaires et où passent les gaz.

L'air circule autour des tubes par des jeux de chicanes, ou même normalement aux tubes grâce aux tôles de séparation perpendiculaires aux tubes. La circulation est donc dans l'ensemble à contre courant, mais croisée dans chaque section. Le plus souvent, on emploie des tubes nus, mais comme pour les surchauffeurs et économiseurs, il peut être avantageux d'utiliser des ailettes. Dans ce cas,

les formes de celle-ci ne doivent pas favoriser l'encrassement. Par contre, elles doivent permettre le nettoyage facile.

On a aussi utilisé des tubes de fonte ou des tubes recouverts de pièces en fonte avec ou sans ailettes surtout dans les parties à basses températures.

Le réchauffeur d'air rotatif Ljungström, réchauffeur d'air régénératif, constitué par un empilement de tôles ondulées de 1 mm d'épaisseur, disposées dans une série de secteur du rotor tournant à 3 – 5 tours/min connaît un grand développement. Les secteurs s'insèrent alternativement dans des conduits de gaz chauds et d'air. Chacun se trouve alors successivement traversés par les gaz, puis par l'air. La séparation entre les deux fluides est assurée par les parois des secteurs.

Le mode d'équipement en matière du réchauffage d'air de combustion varie selon le combustible dont la teneur en soufre peut être forte, faible ou nulle. Il est admis que les parois les plus froides des réchauffeurs sont sensiblement égales à la moyenne entre la température de l'air à l'entrée et la température des fumées à la sortie. Pour éviter une forte condensation acide sur leur surface, il faut protéger les réchauffeurs.

1.5. Principaux circuits d'une chaudière et les facteurs influençant leur fonctionnement

Les principaux circuits d'une chaudière sont :

- Le circuit d'eau d'alimentation de la chaudière ;
- Le circuit d'alimentation en combustible ;
- Le circuit d'alimentation en air ;
- Le circuit d'eau chaude ou de vapeur (saturée ou surchauffée) produite,
- Le circuit d'extraction des fumées produites par combustion.

Le fonctionnement d'une chaudière fait essentiellement intervenir trois facteurs :

- La combustion d'un combustible (ou la production de chaleur à partir de sources électrique et nucléaire respectivement pour les chaudières électriques et nucléaires) ;
- Le passage des fumées de combustion dans la chaudière depuis le foyer de combustion jusqu'à la cheminée,
- Et le transfert de chaleur des produits de la combustion au fluide caloporteur (de l'eau essentiellement dans le cadre de cette étude).

Ces trois facteurs auront des influences notables sur le rendement de l'ensemble et sur le fonctionnement correct de l'appareil au cours du temps.

1.6. Circulation dans une chaudière

On entend par circulation dans une chaudière, l'ensemble des courants ascendants des bulles de vapeur et des courants ascendants d'eau.

Une circulation facile est indispensable au fonctionnement de la chaudière. C'est ainsi que dans les chaudières, une bonne circulation de l'eau nécessite une certaine vitesse.

- Des vitesses trop faibles de l'émulsion d'eau et de vapeur peuvent conduire à la formation de poche de vapeur dans les tubes évaporateurs.
- Une bonne circulation, uniformisant la température d'eau, évite d'abord des déformations pouvant entraîner des tensions locales. Enfin, elle évite l'arrivée de grosses bulles dans les collecteurs de vapeur ainsi que l'émulsion tumultueuse qui favorise un phénomène particulier appelé « primage ». le primage est l'entraînement de l'eau dans de la vapeur (mais aussi l'inverse i.e. de la vapeur dans de l'eau).

La circulation dans la chaudière peut normalement être des trois catégories que sont : la circulation naturelle, la circulation contrôlée et la circulation forcée.

1.6.1. La circulation naturelle

La circulation naturelle est basée 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.

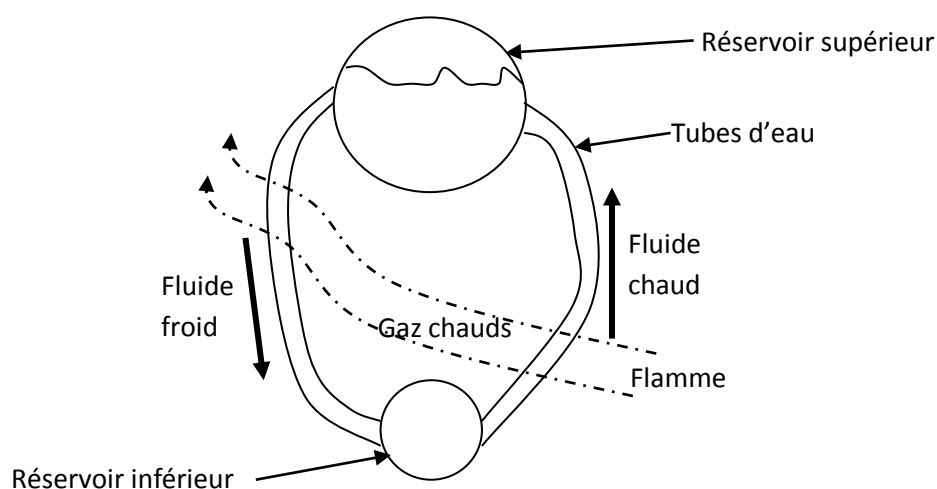


Figure n°1 : Principe de la circulation naturelle (thermosiphon)

Dans les chaudières à vapeur, ce phénomène est encore accéléré par la présence de vapeur dans la colonne montante. L'intensité de la circulation sera d'autant plus forte que le volume occupé par la vapeur sera plus grand dans la colonne ascendante.

Les vitesses obtenues dans la plupart des appareils se situent entre 0,35 et 1 m/s. les vitesses élevées seront recherchées pour les chaudières de haute pression du fait de l'importance du flux rayonnant au niveau du foyer et de leur hauteur grande en général.

Nous constatons d'ailleurs une augmentation avec la pression du titre de la vapeur produite par les chaudières actuelles. Mais au fur et à mesure que la pression et la température de service augmente, la masse volumique de la vapeur croît et tend à se rapprocher de celle de l'eau.

Les deux valeurs sont égales (masses volumiques à la pression critique, et même avant qu'elle soit atteinte, il faut une intervention mécanique pour assurer le mouvement de l'eau dans la chaudière : ce qui est désigné par la circulation forcée. Comme chaudières à circulation naturelle, nous avons :

- Les chaudières dites sectionnelles
- Les chaudières de type Stirling
- Les chaudières sans faisceaux à rayonnement

Dans les chaudières sectionnelles, chaque nappe verticale de tubes comprise entre un collecteur d'alimentation et un collecteur de vapeur constitue une section. Les retours d'eau ne sont pas chauffés. Ces chaudières offrent de grands avantages de construction :

- Un seul réservoir avec peu de perçages
- Des tubes droits
- La possibilité de libre dilatation de chaque section

Les tubes sont inclinés de 15° et mandrinés à leurs extrémités à des collecteurs. Cette construction a été généralisée par les sociétés BABCOCK et WILCOX.

Le type « marine » avec réservoir transversal s'est substitué au type précédent pour les grandes chaudières des centrales thermiques.

- ⊗ Dans les sectionnelles, la circulation ne se fait pas toujours de façon parfaite. Pour de faibles charges de ces chaudières, la vitesse du mélange eau-vapeur dans les tubes vaporisateurs peut devenir très faible voire s'annuler. Si la condition pour que la circulation ascendante de l'eau puisse s'établir dans les tubes $\Delta P_m > \Delta P_c$ (avec P_m la pression motrice et ΔP_c la pression équivalente aux pertes de charges dans les tubes) n'est pas satisfaite, on assiste alors à un renversement de la circulation. L'eau s'écoule alors vers le collecteur d'alimentation tandis que la vapeur s'accumule dans la partie supérieure des et s'échappe vers le haut. Il y a donc

dégagement de vapeur seule. Dans ce cas, les conditions de transfert de chaleur sont par conséquent modifiées. La vapeur refroidissant beaucoup moins les tubes que l'eau. Comme dans cette zone, la température des gaz chauds de combustion peut dépasser 600°C, on a en général un bon risque de surchauffe du métal et en particulier l'attaque de l'acier par de la vapeur d'eau (chimie des classes secondaires). Cela explique les dommages souvent constatés dans cette zone intermédiaire et la corrosion dans la partie des tubes opposés au feu à l'endroit où les porches de vapeur séjournent des parties supérieures des tubes.

- ✘ Les chaudières Stirling sont des chaudières à plusieurs réservoirs nécessitant des tubes cintrés afin de permettre leur dilatation inégale. Ces chaudières se sont développées à partir du moment où il était devenu possible de fabriquer des tubes soudés. Cela a permis :
 - d'obtenir des tubes plus longs, donc de produire plus de vapeur ;
 - d'avoir aussi des inclinaisons de tubes les plus importants améliorant ainsi la circulation naturelle. La pression limite n'excédait pas toutefois 60 bars.
- ✘ Dans les chaudières sans faisceaux à rayonnement, il n'existe plus qu'un seul réservoir avec des collecteurs d'alimentation (différence avec les chaudières Stirling) des tubes écrans d'eau reliés à ce réservoir par des tubes de retour extérieurs au foyer. Dans ces générateurs, les parois des chambres de combustion sont entièrement recouvertes d'écrans d'eau. Elles ne comportent donc plus de matériaux réfractaires mais seulement une isolation calorifique. Dans ce cas, la grande surface des parois de la chambre garnie de tubes d'écrans est alors suffisante pour assurer, par rayonnement ; la vaporisation de l'eau sans qu'il y ait besoin de recourir à un faisceau travaillant en convection.
- ✘ La grande puissance de vaporisation (jusqu'à 2000 tonnes de vapeur /heure) nécessite débit de combustible important, ce qui produit un débit de fumées très grand. Il est donc nécessaire de construire des chaudières dont le volume de la chambre de combustion est très grand.
- ✘ La température de la chambre de combustion devant être limitée pour éviter que les parois soient salies par la fusion des cendres ; il faut donner aux parois une grande efficacité de refroidissement.

Ces chaudières peuvent être équipées d'un foyer mécanique mais elles sont, le plus souvent, munies d'une batterie de brûleurs à fuel ou à gaz.

C'est dans cette catégorie de chaudière que l'on classe les chaudières destinées aux grandes centrales thermiques modernes, productrices d'énergie électrique, de forte puissance et à haute pression.

1.6.2. La circulation contrôlée

La circulation contrôlée est un cas de circulation forcée. Les chaudières dont le fonctionnement repose sur le principe de la circulation forcée se ramènent à deux types :

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

Comme exemple de la chaudière à circulation contrôlée, nous avons la chaudière La Mont. Celle-ci diffère de la chaudière à circulation naturelle par l'installation de pompe sur les tuyaux de retour d'eau reliant le réservoir R aux collecteurs d'alimentation B des tubes vaporisateurs.

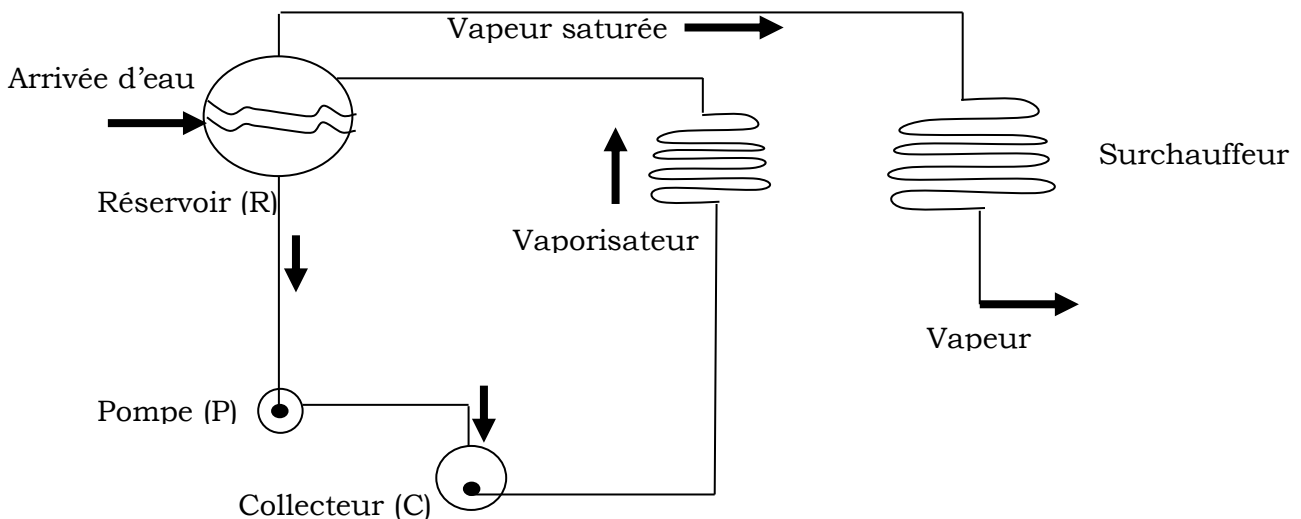


Figure n°-2 : Circulation contrôlée dans une chaudière La Mont

La répartition de l'eau dans les tubes branchés sur le collecteur se réalise au moyen de tuyères calibrées placées à l'entrée de chaque tube. Une crépine permet d'arrêter des particules solides éventuellement présentes dans l'eau d'alimentation. Dans ce type de chaudière, la circulation étant établie avant l'allumage du feu, il n'est pas nécessaire d'attendre à ce que s'établisse la circulation ; elle s'effectue naturellement ce qui réduit le temps de mise en service.

L'intérêt économique des chaudières de type La Mont réside surtout au niveau de l'investissement (tubes moins gros et plus minces, donc moins chers) ; cela a été démontré pour de fortes puissances. On admet généralement qu'il est nécessaire d'atteindre au moins une pression égale à 160 bars.

1.6.3. La circulation forcée

La circulation forcée a l'avantage d'assurer une vitesse convenable de fluide dans les tubes de formes quelconques quelle que soit la pression de la chaudière.

Dans la circulation en série, ou circulation en circuit ouvert, il n'y a pas de réservoir d'accumulation d'eau et de vapeur. La vaporisation s'effectue entre l'échauffement et la surchauffe dans un circuit. L'eau refoulée par la pompe est vaporisée puis surchauffée et délivrée directement à la sortie des tubes de chauffe. C'est le cas avec les chaudières Benson, Sulzer, Löffler. Ces chaudières peuvent être employées aussi bien pour les pressions inférieures à la pression critique que pour des pressions supérieures (chaudières hypercritiques). Néanmoins, d'une manière générale, on n'emploie pas des chaudières à circulation forcée pour des pressions inférieures à 80 bars (en raison du coût).

La circulation forcée permet de faire circuler l'eau dans les tubes et dans les collecteurs dès l'avant mise à feu et pendant les opérations de démarrage. Cela constitue un avantage appréciable car il en résulte une répartition plus uniforme de la température du métal et des dilatations de l'ensemble du générateur.

La circulation forcée ne supprime pas nécessairement tout risque d'assèchement. La zone d'évaporation est suivie d'une zone de surchauffe dont la perte de charge est importante et joue le rôle de stabilisateur. Mais la possibilité de régime instable subsiste. Dans les chaudières à circulation forcée, l'emploi de petits tubes et la nécessité de prévoir des pertes de charges stabilisatrices entraîne une chute importante (élevée) entre l'alimentation en eau et la sortie de la vapeur d'environ 30 à 40% de la pression d'admission (250bars) contre 20 à 25% pour une chaudière à circulation naturelle.

A présent, nous allons étudier les chaudières à eau chaude et les chaudières à vapeur.

1.7. Les chaudières à eau chaude

Ces chaudières ont été conçues selon les principes de robustesse des chaudières industrielles. Elles répondent à tous les besoins de chauffage des collectivités, ensemble commerciaux et résidentiels, ensembles scolaires et universitaires, centres sportifs, piscines, hôpitaux, usines, serres de culture,... etc.

1.7.1. La chaudière de production d'eau chaude à foyer borgne

1.7.1.1. Présentation

La chaudière est en acier, monobloc, horizontale et cylindrique. Elle est d'un encombrement réduit facilitant sa mise en place en chaufferie.

Elle peut être équipée indifféremment d'un brûleur fuel, gaz ou mixte, suivant les préconisations des différents constructeurs. Une large porte avant, recevant le brûleur, permet l'accès total au foyer et au faisceau tubulaire. La boîte à fumées arrière, totalement intégrée au corps de la chaudière, est munie d'un fond démontable et d'une ou deux



trappes de visite pour nettoyage. Une jaquette en tôle pré laquée, démontable, protégeant une isolation en laine minérale de 80mm d'épaisseur, habille esthétiquement la chaudière.

Fig. 3. Chaudière à eau chaude à foyer borgne

1.7.1.2. Principe

La chaudière possède un foyer borgne pressurisé à inversion de flamme constituant les deux premiers parcours. Ce principe de re-circulation des gaz de combustion dans la flamme permet d'atteindre une combustion optimale à faible excès d'air.

Figure. 4. Vue montrant le foyer de la chaudière à eau chaude à foyer borgne



Tableau 1: Modèles et caractéristiques des chaudières à eau chaude à foyer borgne

Modèle	Code chaudière	Puissance utile		Débit thermique		Rendement		Contrepression mbar	Dimensions (H x L x P en mm)	Poids kg
		kW	kcal/h	kW	kcal/h	100%	30%			
REX 7	83801010	70	60.000	76	65.360	92,11	90,18	0,8	1030 x 750 x 1055	216
REX 8	83801020	80	69.000	87	74.820	91,95	90,23	1,0	1030 x 750 x 1055	216
REX 9	83802010	90	77.000	98	84.280	91,84	90,30	0,8	1030 x 750 x 1195	258
REX 10	83802020	100	86.000	109	93.740	91,74	90,40	1,0	1030 x 750 x 1195	258
REX 12	83802030	120	103.000	131	112.660	91,60	90,45	1,1	1030 x 750 x 1195	258
REX 15	83803010	150	129.000	163	140.180	92,02	91,15	1,2	1080 x 800 x 1440	346
REX 20	83803020	200	172.000	218	187.480	91,74	91,36	1,9	1080 x 800 x 1440	346
REX 25	83804010	250	215.000	272	233.920	91,91	90,40	2,0	1080 x 800 x 1690	431
REX 30	83805010	300	258.000	325	279.500	92,31	90,62	2,0	1180 x 900 x 1690	475
REX 35	83806010	350	301.000	380	326.800	92,11	90,50	2,9	1180 x 900 x 1940	542
REX 40	83807010	400	344.000	433	372.380	92,38	90,81	4,1	1190 x 940 x 1872	584
REX 50	83808010	500	430.000	542	466.120	92,25	90,71	4,2	1380 x 1160 x 1950	853
REX 62	83809010	620	533.000	672	577.920	92,26	90,68	6,4	1380 x 1160 x 2240	963
REX 75	83810010	750	645.000	813	699.180	92,25	90,60	5,2	1510 x 1290 x 2255	1205
REX 85	83810020	850	731.000	921	792.060	92,29	90,73	7,2	1510 x 1290 x 2255	1205
REX 95	83811010	950	817.000	1030	885.800	92,23	90,70	5,2	1510 x 1290 x 2500	1417
REX 100	83812010	1020	877.000	1106	951.160	92,22	90,65	4,0	1660 x 1440 x 2500	1843
REX 120	83812020	1200	1.032.000	1301	1.118.860	92,24	90,67	5,5	1660 x 1440 x 2500	1843
REX 130	83812030	1300	1.118.000	1409	1.211.740	92,26	90,61	6,5	1660 x 1440 x 2500	1843
REX 140	83813010	1400	1.204.000	1517	1.304.620	92,29	90,36	6,0	1746 x 1470 x 2886	2600
REX 160	83813020	1600	1.376.000	1733	1.490.380	92,33	90,41	6,5	1746 x 1470 x 2886	2600
REX 180	83814010	1800	1.548.000	1950	1.677.000	92,31	90,50	7,0	1746 x 1470 x 3096	2750
REX 200	83815010	2000	1.720.000	2167	1.863.620	92,29	90,30	6,0	1876 x 1600 x 3220	3650
REX 240	83816010	2400	2.064.000	2600	2.236.000	92,31	90,60	7,5	1876 x 1600 x 3480	3900
REX 300	83817010	3000	2.580.000	3250	2.795.000	92,31	90,55	8,0	2146 x 1870 x 3480	5200
REX 350	83818010	3500	3.010.000	3792	3.261.120	92,30	90,20	9,0	2146 x 1870 x 3935	5700

Le troisième parcours des gaz s'effectue dans un faisceau horizontal de tubes de fumées judicieusement répartis au dessus du foyer laissant parfaitement libre le fond de la chaudière. Les tubes de fumées, lisses, reçoivent des tubulures en acier à pas variable, conçus pour accroître l'énergie dynamique des gaz de combustion et permettre à l'ensemble d'atteindre des performances élevées. La disposition du retour d'eau à l'arrière et en partie basse ainsi que la libre circulation sous

aluminium gaufré et une couche épaisse de matériel calorifuge. Grâce aux protections spéciales anti-condensations, comme l'utilisation d'un tuyau à double paroi isolé à lame d'air différenciée, les chaudières de la série GREENOx BT peuvent fonctionner avec de l'eau à basses températures (retour minimum 35°C). Revêtement industriel en aluminium gaufré.



Figure 6. Chaudière à eau chaude à 3 parcours en ligne

Tableau 3 : Modèles et caractéristiques des chaudières à eau chaude à 3 parcours en ligne

Modèle	Code chaudière	Puissance utile		Débit thermique		Rendement		Contrepression mbar	Dimensions (H x L x P en mm)	Poids kg
		kW	kcal/h	kW	kcal/h	100%	30%			
GREENOx BT 70	83080703	700	602.000	761	654.348	91,98	91,68	2,7	1775 x 1380 x 2570	2220
GREENOx BT 90	83080903	900	774.000	978	841.304	92,02	91,72	2,7	1825 x 1490 x 2624	3040
GREENOx BT 100	83081003	1000	860.000	1087	934.783	92,00	91,70	3,5	1825 x 1490 x 2624	3040
GREENOx BT 120	83081203	1200	1.032.000	1304	1.121.739	92,02	91,72	5,1	1825 x 1490 x 2934	3360
GREENOx BT 140	83081403	1400	1.204.000	1522	1.308.696	91,98	91,68	5,4	1965 x 1640 x 2976	4120
GREENOx BT 170	83081703	1700	1.462.000	1848	1.589.130	91,99	91,69	8,0	1965 x 1640 x 3476	4825
GREENOx BT 200	83082003	2000	1.720.000	2174	1.869.640	92,00	91,70	8,5	1965 x 1640 x 3476	4.825

1.7.2. Chaudière eau chaude 3 parcours à condensation

Ce sont des générateurs de chaleur à condensation prédisposés pour une installation individuelle ou modulaire. Dimensions compactes, contenu en eau élevé, elles ont un rendement jusqu'à 107%.

Tableau 4 : Modèles et caractéristiques des chaudières à eau chaude à 3 parcours en condensation

Modèle	Code chaudière	Puissance utile*		Débit thermique		Rendement		Contrepression mbar	Dimensions (H x L x P en mm)	Poids kg
		kW	kcal/h	kW	kcal/h	40°-30°C	80°-60°C			
STELT 75	81026201	75	64.500	70	60.000	107,5	97,0	0,7	1190 x 773 x 1155	170
STELT 90	81026202	90	77.400	84	72.000	107,5	97,0	0,9	1190 x 773 x 1155	170
STELT 120	81026203	120	103.200	112	96.450	107,0	96,5	1,5	1190 x 773 x 1155	170
STELT 160	81026302	160	137.600	150	128.600	107,0	96,5	2,5	1290 x 873 x 1155	205
STELT 220	81026402	220	189.200	205	176.000	107,5	97,0	4,2	1290 x 873 x 1410	220
STELT 270	81026502	270	232.200	251	216.000	107,5	97,0	3,0	1290 x 1003 x 1463	330
STELT 320	81026503	320	275.200	299	257.200	107,0	97,0	4,2	1290 x 1003 x 1463	330

* Sur la base d'une température de l'eau de 50-30 °C

La chaudière STELT est un générateur de chaleur breveté par ICI CALDAIE qui assure une simple et facile application de la condensation même sur la plus grande partie des installations existantes. Les parties intérieures en contact avec les produits de la combustion et la conduite de l'eau sont entièrement réalisées en acier INOX AISI 316 Ti.



RENDEMENT

Figure 7. Chaudière eau chaude 3 parcours à condensation

1.7.3. Chaudière eau chaude avec batterie de condensation

Les générateurs de chaleur **GREENOx BT COND** sont des générateurs à flamme passante à triple parcours des gaz de fumée et fond mouillé au fonctionnement complètement automatique. Conçus pour fonctionner aux basses températures avec l'utilisation de la technologie à deux tuyaux qui permet des températures de retour jusqu'à 354° C, ils sont équipés pour un fonctionnement à condensation avec une batterie de condensation de grande superficie construite entièrement en acier INOX 316 Ti.



Figure 8. Chaudière à eau chaude avec batterie de condensation

Tableau 5 : Modèles et caractéristiques des chaudières à eau chaude avec batterie de condensation

Modèle	Code chaudière	Puissance utile*		Débit thermique		Rendement		Contrepression mbar	Dimensions (H x L x P en mm)	Poids kg
		kW	kcal/h	kW	kcal/h	40°-30°C	80°-60°C			
GREENOx BT 80 COND	83080850	800	688.000	744	640.000	107,5	97,5	7,3	1930 x 1380 x 4119	2.905
GREENOx BT 100 COND	83081050	1.000	860.000	930	800.000	107,5	97,5	7,3	2019 x 1490 x 4204	3.760
GREENOx BT 110 COND	83081150	1.100	946.000	1.023	880.000	107,5	97,5	9,0	2019 x 1490 x 4204	3.760
GREENOx BT 140 COND	83081450	1.400	1.204.000	1.302	1.120.000	107,5	97,5	11,5	2084 x 1490 x 4514	4.110
GREENOx BT 160 COND	83081650	1.600	1.376.000	1.488	1.280.000	107,5	97,5	11,9	2224 x 1640 x 4555	4.895
GREENOx BT 200 COND	83082050	2.000	1.720.000	1.860	1.600.000	107,5	97,5	14,5	2224 x 1640 x 5049	5.560
GREENOx BT 230 COND	83082350	2.300	1.978.000	2.140	1.840.000	107,5	97,5	15,0	2224 x 1640 x 5049	5.560

* Sur la base d'une température de l'eau de 50-40 °C



Figure 9. Chaudière à eau chaude à condensation pour extérieur

1.7.6- Chaudière à condensation pour extérieur

Groupe thermique modulaire à condensation à basse charge thermique, prévu pour un fonctionnement avec combustibles gazeux. Les brûleurs de type modulant sont à air pulsé, corps cylindrique à rayonnement et à basses émissions de NOx. Les parties en contact avec les produits de combustion - foyer et plaques de fumées - sont entièrement construites en acier INOX stabilisé à l'utitane AISI 316 Ti. L'habillage externe est en acier INOX AISI 316 L, calorifugé à l'intérieur avec une très épaisse couche de laine de verre à haute densité. Chaque module est doté de quatre commandes avec régulateur de température numérique pour la gestion du brûleur. Le groupe thermique WALL peut être constitué de 1 à un maximum de 4 modules pour une puissance maximum de 600kW utile, et comprenant des collecteurs hydrauliques, des collecteurs de fumées et des dispositifs de sécurité.

Dans le cas de 2 ou plusieurs modules (WALL 300, 450 et 600), un régulateur approprié permet une gestion en cascade des générateurs.

Tableau 6 : Modèles et caractéristiques des chaudières à eau chaude à condensation pour extérieur

Modèle	Code chaudière	Puissance utile*		Puissance foyer kW	Rendement		Contrepression mbar	Dimensions (H x L x P en mm)	Ø C mm	Poids kg
		70°C kW	50-30°C kW		70°C 100% Pn	50-30°C 100% Pn				
VERSION À ASSEMBLER SUR SITE										
WALL 125	81029125	113	124	115	98,3	107,5	109	3,4	1265 x 775 x 1975	130 250
WALL 150	81029150	137	150	140	98,3	107,5	109	3,4	1265 x 775 x 1975	130 250
WALL 250	81029250	227	248	231	98,3	107,5	109	3,4	1265 x 1330 x 1975	250 500
WALL 300	81029300	274	300	279	98,3	107,5	109	3,4	1265 x 1330 x 1975	250 500
WALL 375	81029375	340	372	346	98,3	107,5	109	3,4	1265 x 1910 x 1975	250 750
WALL 450	81029450	412	450	419	98,3	107,5	109	3,4	1265 x 1910 x 1975	250 750
WALL 500	81029500	454	496	461	98,3	107,5	109	3,4	1265 x 2490 x 1975	250 1000
WALL 600	81029600	549	600	558	98,3	107,5	109	3,4	1265 x 2490 x 1975	250 1000
VERSION COMPLÈTEMENT MONTÉE SUR SOCLE										
WALL 250 M	81029251	227	248	231	98,3	107,5	109	3,4	1335 x 1330 x 1975	250 660
WALL 300 M	81029301	274	300	279	98,3	107,5	109	3,4	1335 x 1330 x 1975	250 660
WALL 375 M	81029376	340	372	346	98,3	107,5	109	3,4	1335 x 1910 x 1975	250 985
WALL 450 M	81029451	412	450	419	98,3	107,5	109	3,4	1335 x 1910 x 1975	250 985
WALL 500 M	81029501	454	496	461	98,3	107,5	109	3,4	1335 x 2490 x 1975	250 1300
WALL 600 M	81029601	549	600	558	98,3	107,5	109	3,4	1335 x 2490 x 1975	250 1300

1.7.4. Chaudière à eau chaude sanitaire et production eau chaude industrielle à condensation

1.7.4.1. Les applications

La chaudière à condensation répond, dans l'habitat collectif, le moyen et le grand tertiaire ainsi que dans l'industrie aux besoins d'eau chaude sanitaire, de service et de process. Sa conception technique, depuis plus de 20 ans, a fait la preuve de sa fiabilité dans tous ces domaines d'application. Divers perfectionnement en font un matériel qui demeure sans égal par les **avantages**

techniques et **d'exploitation** qu'il apporte. De plus, c'est un produit déjà largement connu dans l'Union Européenne (France, Belgique, Grande Bretagne, Pays-Bas, Allemagne) ainsi qu'en Suisse.

1.7.4.2. Le descriptif technique

La chaudière à condensation comprend :

- un foyer cylindrique vertical
- un (ou deux) tube(s) de fumées formé(s) en serpentin
- une cuve équipée de deux orifices de visite (l'un sur le fond supérieur, l'autre à l'arrière en bas de la virole. Cet ensemble est entièrement **en acier inoxydable austénitique** et prévu pour une pression de marche jusqu'à 7 bars.
- une soupape de sécurité est fournie
- une boîte de fumées, en acier inoxydable
- un brûleur à air soufflé à une allure (2 allures sur le 150 kW - en option - et le 300 kW)
 - allumage par train d'étincelles
 - contrôle de flamme par ionisation
 - débit de gaz contrôlé par multi bloc
- un tableau de bord comprenant :
 - bouton marche/arrêt
 - thermostat de réglage
 - thermostat limiteur pour éviter la montée en température excessive lors d'un puisage discontinu
 - thermostat de sécurité
 - voyant haute température
 - voyant défaut brûleur
- une isolation de la cuve par de la laine de verre protégée par une feuille d'aluminium
- un habillage parallépipédique en tôle laquée.

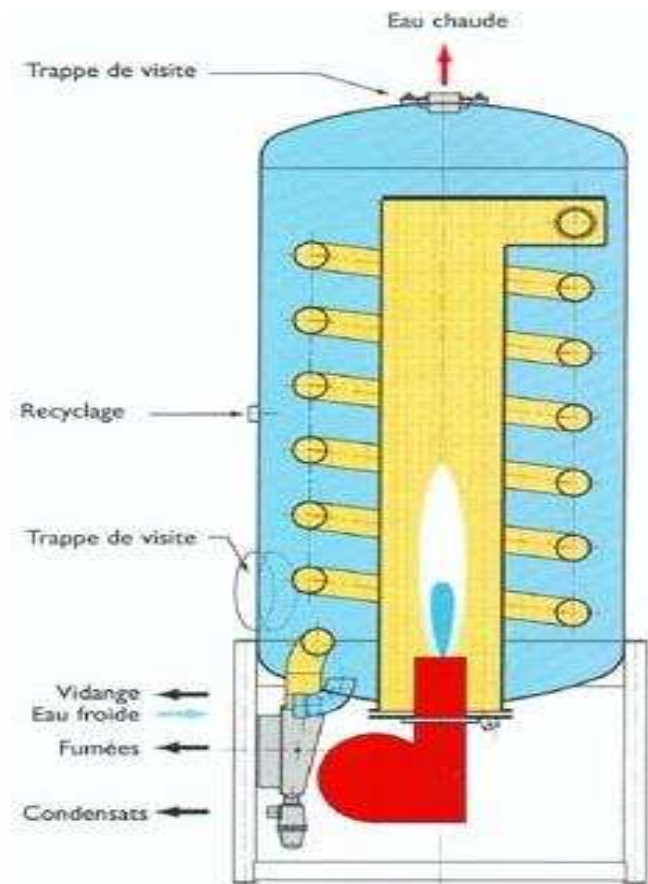


Figure 10. Chaudière eau chaude sanitaire

1.7.4.3. Avantages

- ✓ L'économie d'énergie: Rendement 105% PCI (eau réchauffée à 65°C); ce rendement étant très peu influencé par une augmentation de la température de consigne
- ✓ la qualité de l'eau est parfaitement préservée grâce à l'utilisation exclusive de l'acier inoxydable austénitique.
- ✓ Une longue durée de vie grâce à l'utilisation exclusive de l'acier inoxydable austénitique. L'appareil chaudronné est garanti 5 ans (sous réserve que le taux de chlorure de l'eau soit < 80 mg/L).
- ✓ L'économie d'entretien
- ✓ Les installations possibles
 - à l'intérieur des bâtiments à desservir
 - à l'extérieur des bâtiments à desservir
- ✓ La souplesse de service
- ✓ La préservation de l'environnement: Les émissions de NOx sont inférieures à 100 mg/kWh.

1.8. Chaudières à vapeur

Les chaudières à vapeur se classent en deux catégories essentielles selon les parcours des fumées de combustion. Ainsi, les fumées peuvent circuler soit :

- à l'intérieur des tubes et on désigne ces chaudières comme étant à tubes de fumées ;
- à l'extérieur des tubes, tubes à l'intérieur desquels circule l'eau : ce sont des chaudières à tubes d'eau.

1.8.1. Chaudières à tubes de fumées

Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée de 1 à 25 tonnes/heure, en basse et moyenne pression. Le combustible utilisé est soit du gaz soit du fioul.

Les chaudières à tubes de fumées sont des chaudières à circulation naturelle. Le volume de l'eau chauffée est assez important. Si ces chaudières sont chauffées au fuel, ou au gaz, elles peuvent alors être conduites de façon automatisée. Elles sont très compactes et peuvent donc être entièrement montées et essayées en atelier avant d'être expédiées sur le site pour la mise en marche. Mais à partir de 20 bars, cette construction devient délicate à cause des épaisseurs à prévoir pour le corps. La puissance de ces chaudières est relativement faible. De nos jours, la production maximale de vapeur est de 30 tonnes/heure pour une pression maximale de 25 bars.

Le principe même de ces chaudières ne se prête guère à l'obtention de vapeur surchauffée. Cependant, la production de vapeur surchauffée est possible. Le surchauffeur est alors placé, soit dans la boîte de retour, soit dans la chambre de réversion. Dans ces types de chaudière c'est le tube foyer, où se déroule la combustion qui risque le plus de détérioration par la surchauffe du métal (rayonnement des flammes). Pour limiter sa température, il est nécessaire de maintenir parfaitement propre la surface extérieur u tube foyer afin d'obtenir un échange thermique optimal. Le tube foyer,

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

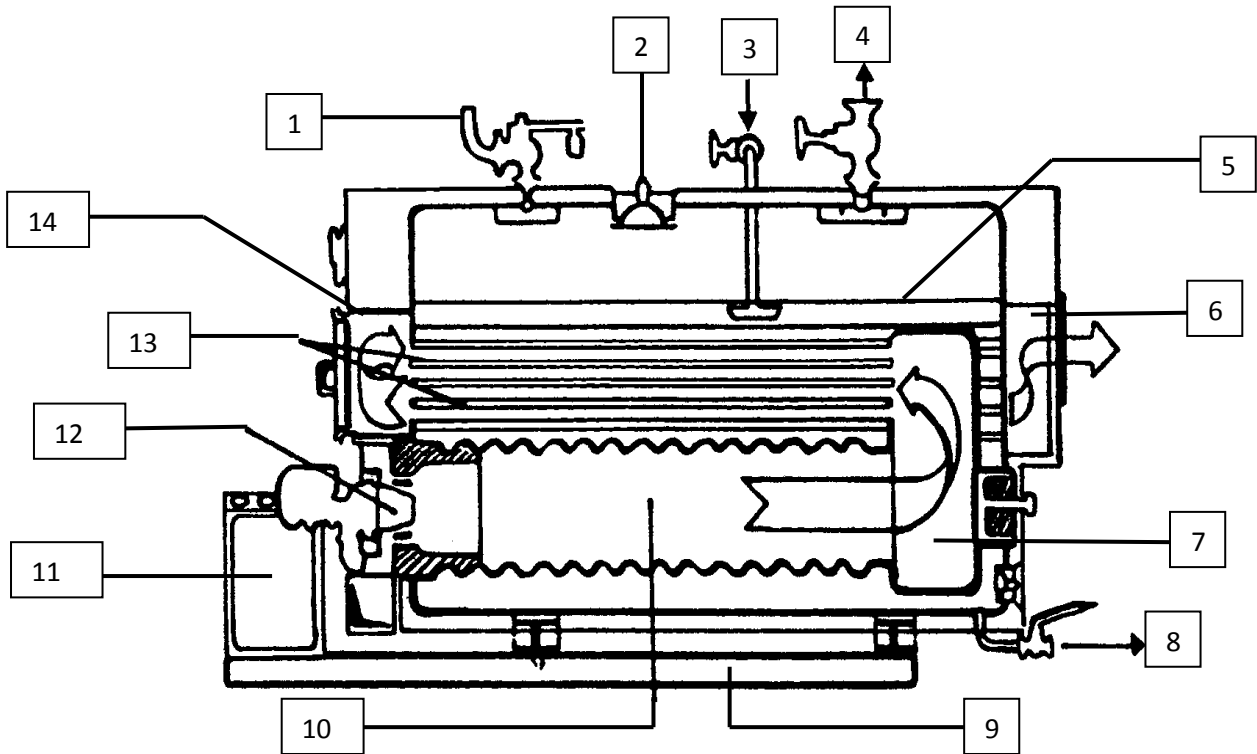


Figure 11. Chaudière à tube de fumée

- | | |
|----------------------------------|--|
| 1. Foyer | 2. Tube de fumée 2ème passe |
| 3. Tube de fumée 3ème 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 | |

Il y a donc circulation des gaz de combustion dans des tubes assurant, par conduction vers l'eau de la cuve, la vaporisation par apport de calories. Un second groupe de tubes immergés emmène les gaz vers un troisième caisson à l'arrière de la chaudière, ce troisième caisson débouche sur la cheminée pour évacuation des fumées vers l'extérieur.

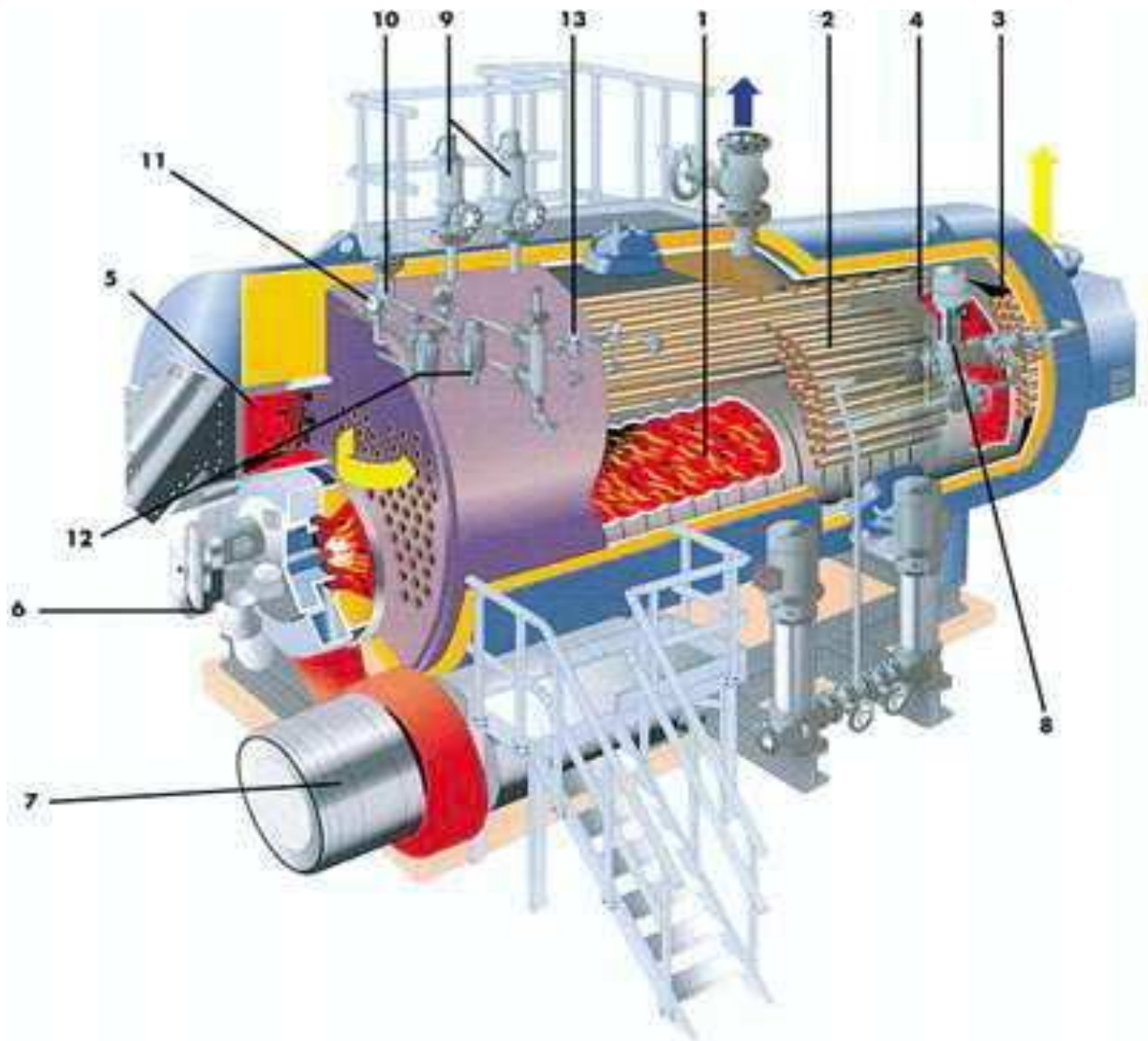


Figure 12. Chaudière à tubes de fumée

Légende :

- | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| 1- Soupape de sûreté | 2- Visite |
| 3- Détecteur de manque d'eau | 4- Prise de vapeur |
| 5- Niveau de l'eau | 6- Boîte à fumée |
| 7- Boîte de retour 1050 à 1150°C | 5- Extraction (purge) |
| 9- Support | 10- Tube foyer |
| 11- Ouvreau | 12- Brûleur |
| 13- Tube de fumée | 14- Chambre de réversion 420 à 460°C |

Il est nécessaire de recourir à un surchauffeur (source de chaleur indépendante), en aval de la chaudière à tubes de fumée pour produire de vapeur surchauffée.

Les chaudières à tubes de fumée BABCOCK WANSON se caractérisent par l'adéquation optimale du couple chaudière/brûleur qui optimise le rendement et garantit le respect des normes environnementales. BABCOCK WANSON associe également des services sur mesure.

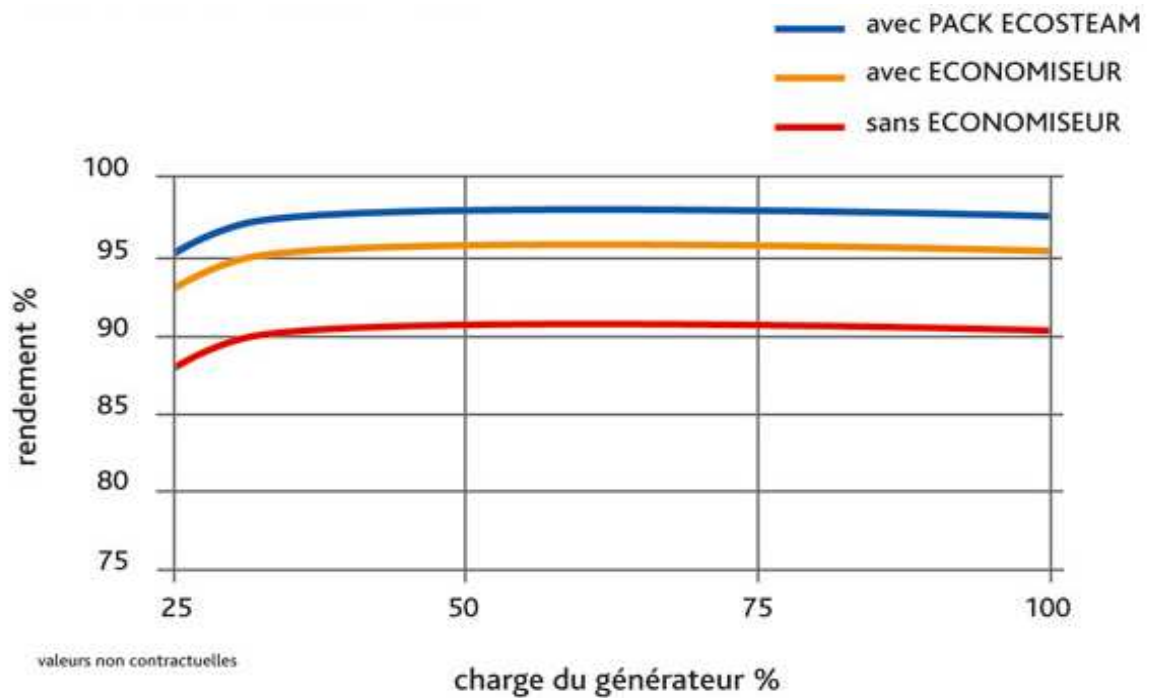


Figure 13. Evolution du rendement de la chaudière BABCOCK

La vapeur est générée en chauffant un important volume d'eau, au moyen de fumées produites par combustion de gaz ou fioul et circulant dans des tubes immergés. C'est la technique la plus classique pour la production de vapeur saturée, d'eau ou de vapeur surchauffée pour une gamme de débits de 160 à 50 000 kg/h (112 à 34 000 kW).

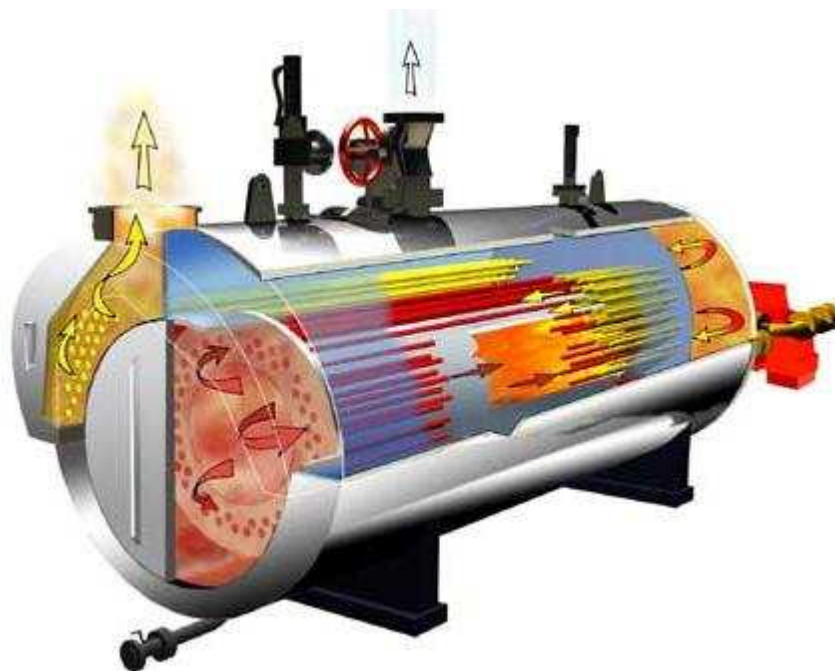


Figure 14. Chaudière à tubes de fumée BABCOCK

Gamme de chaudières à tubes de fumée BABCOCK WANSON:

Production de vapeur : de 160 kg/h à 50 t/h (112 à 34 000 kW) Séries à 3 parcours de fumée, à boîte noyée ou à boîte aquatubulaire, Pression de service de 10 à 18 bar en standard, plus sur demande pour les applications spécifiques. Production d'eau surchauffée: gamme de 1368 à 15000kW possibilité de production d'eau chaude pour les chaudières > à 5MW, avec environnement particulier.

Série	Débit vapeur maxi (t/h)	Pression (bar)	Rendement (%)
BWB	3	10 à 18	88/90 ⁽¹⁾
BWD	10	10 à 18	95 ⁽²⁾ / 97 ⁽³⁾
BWR	30	10 à 18	95 ⁽²⁾ / 97 ⁽³⁾

(1) Rendement à la puissance nominale

(2) Rendements à la puissance nominale avec économiseur

(3) Rendement avec le pack Ecostream®

Toutes les chaudières à tubes de fumée BABCOCK WANSON se caractérisent par l'adéquation optimale du couple chaudière/brûleur qui optimise les échanges thermiques par rayonnement et par convection et améliore le rendement et le respect des normes environnementales des gaz de combustion (NO_x, CO...).

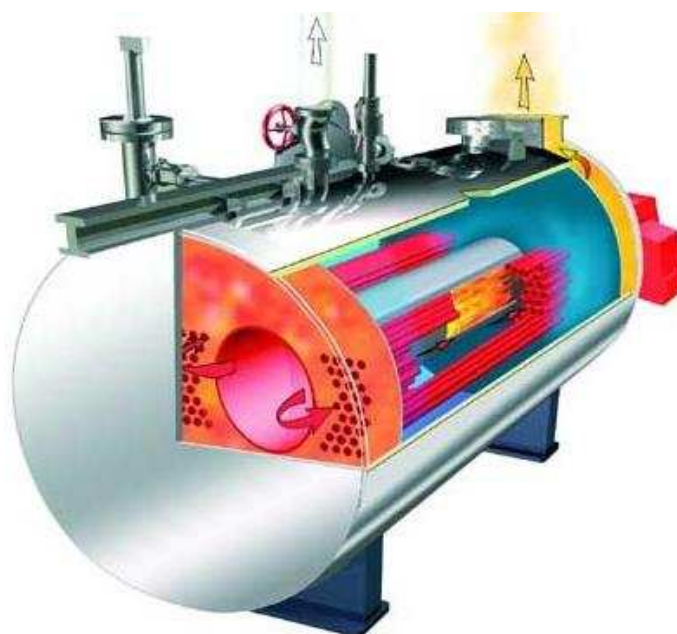


Figure 15. Modèle BWB

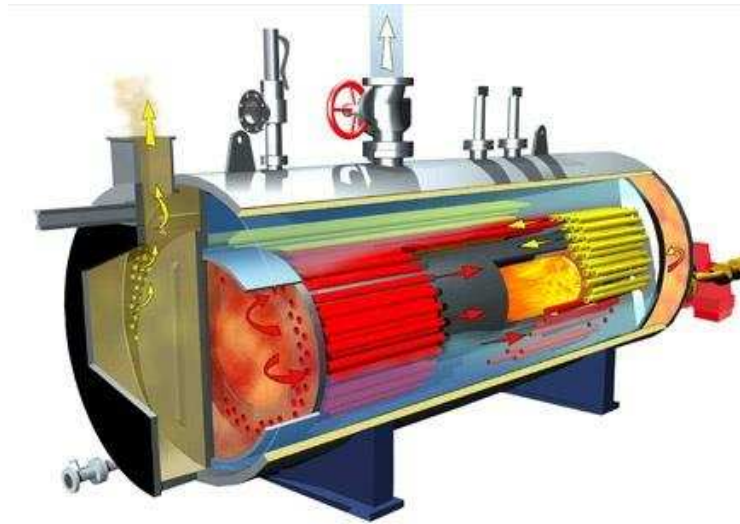


Figure 16. Modèle BWD

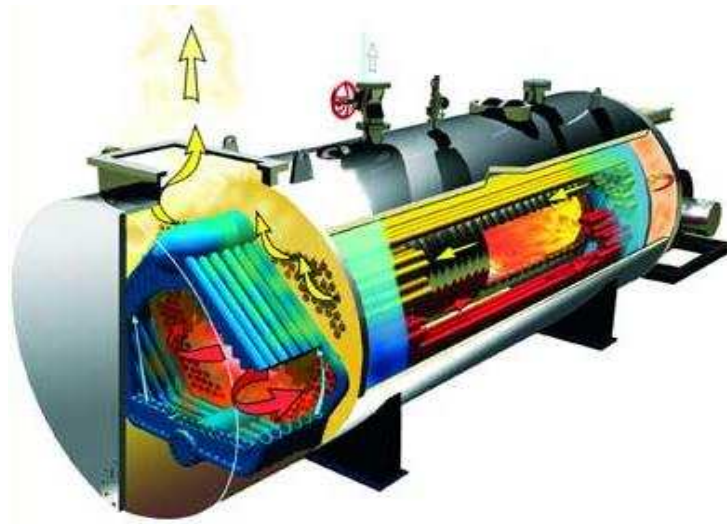


Figure 17. Modèle BWR

1.8.2. Chaudières à tubes d'eau

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.

Les chaudières à tubes d'eau sont de loin les plus utilisées. Dans ces chaudières, la circulation de l'eau peut se faire de différentes façons ; elle peut donc être :

- Naturelle (circulation naturelle)
- Contrôlée (circulation à circuit fermé ou à circuit ouvert).

Dans ce type de construction, c'est le fluide caloporteur (l'eau) qui circule à l'intérieur des tubes plongés dans les gaz de combustion.

Comme chaudières à tubes d'eau, nous avons :

- Les chaudières sectionnelles ;
- Les chaudières à faisceaux tubulaires ;

- Les chaudières à rayonnement.

Outre les chaudières à tubes de fumées et celles à tubes d'eau, il existe des chaudières à lames d'eau. Celles-ci sont obtenues à partir d'éléments laminés plats. Elles supportent mal les pressions intérieures élevées. Elles sont réservées aux petites installations domestiques. Leurs puissances sont comprises entre 120 et 150 th/h. La base de classement serait encore la production horaire de vapeur et l'équivalent approximatif en production de chaleur pour les générateurs à eau chaude sous pression. 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.

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

On obtient ainsi de la vapeur surchauffée à la sortie.

Tableau 7. 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		
<ul style="list-style-type: none"> • Puissance • Débit • Timbre (pression max. d'utilisation) 	<ul style="list-style-type: none"> • moyennement élevée • 1,5 à 25 t/h • 10 à 20 bar 	<ul style="list-style-type: none"> • importante • 4 à 200 t/h • 90 à 100 bar (en circulation naturelle) et jusqu'à 225 bar (circulation forcée)

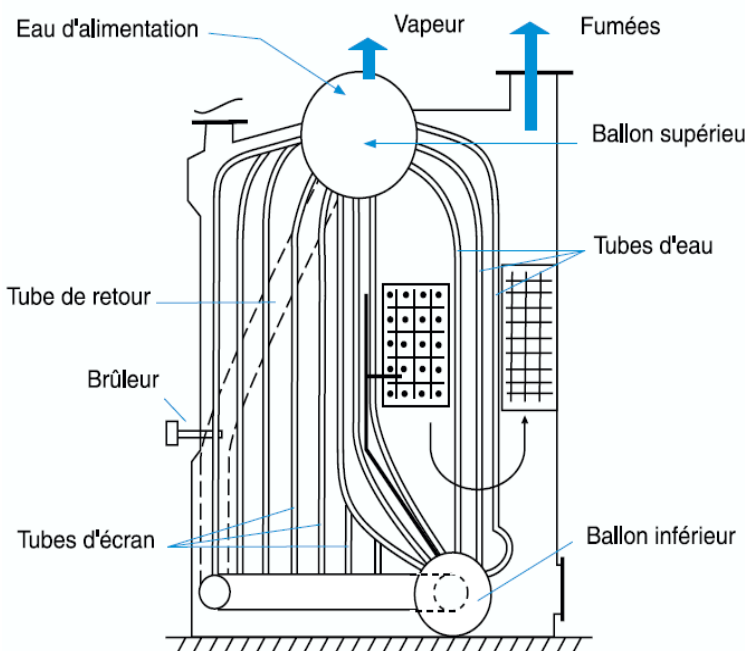


Figure 18. Chaudières à tubes d'eau

La figure suivante est assez révélatrice des dispositions des différentes composantes d'une chaudière à tubes d'eau.

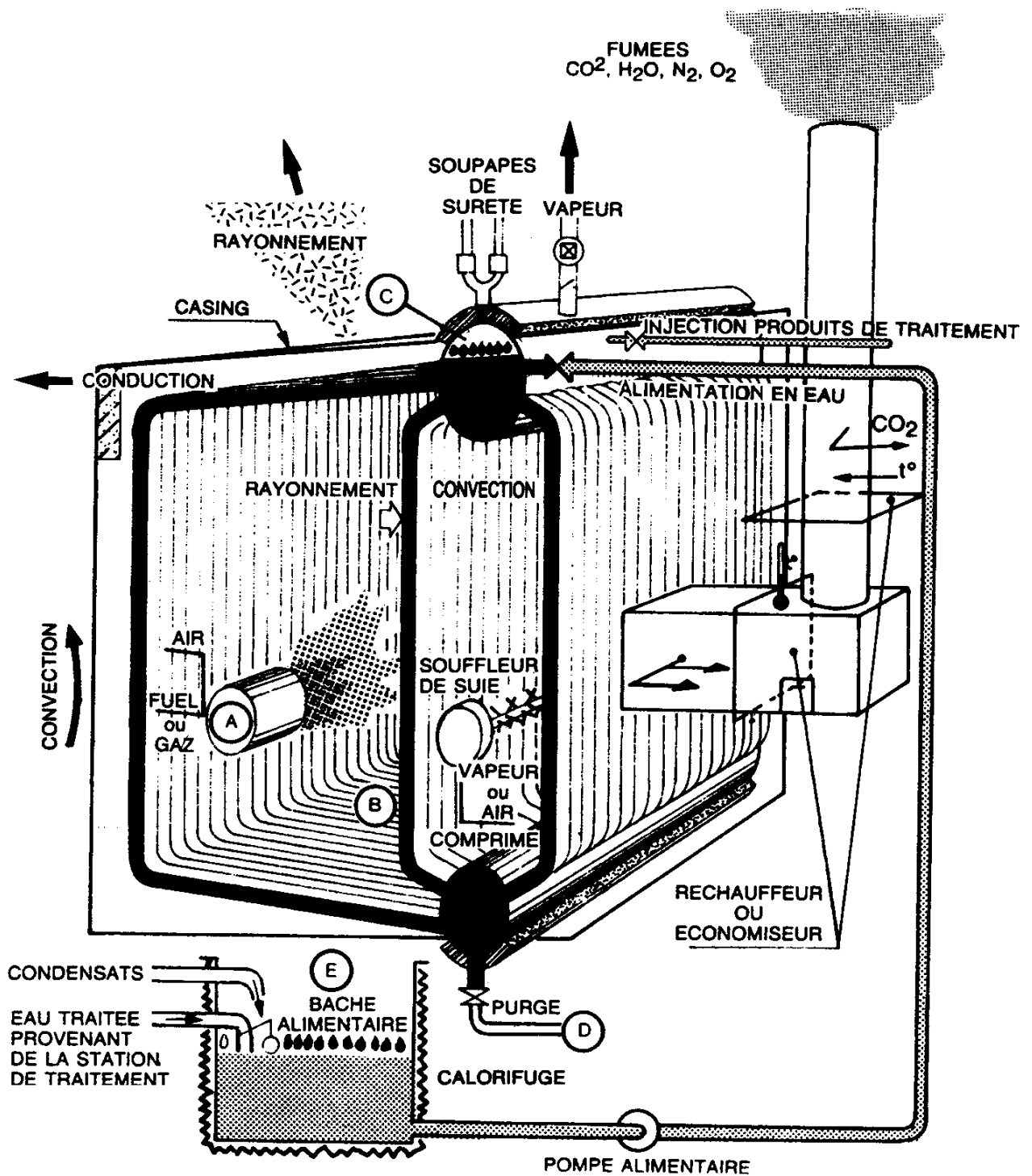


Figure 19. Vue de la structure interne d'une chaudière à tubes d'eau

Un combustible se définit par divers paramètres physiques et chimiques qui dépendent de la nature du combustible. D'une manière générale, les combustibles sont de nature organique, c'est-à-dire qu'ils sont composés de carbone. Ils contiennent des composants combustibles (carbone, hydrogène, soufre) et d'autres composants (oxygène, azote, soufre, etc.).

Les réactions chimiques entre un combustible (carbone, hydrogène, soufre) et un comburant (oxygène pur ou de l'air) sont dites réactions de combustion.

Après avoir caractérisé les combustibles sous leurs différentes formes, nous étudierons la combustion de ces combustibles afin de maîtriser la conduite des chaudières voire des fours lors de leur exploitation.

2.1. Combustibles

On brûle différents types de combustibles dans les chaudières (non électriques). Un combustible est une espèce chimique généralement constituée d'atomes faiblement électronégatifs, ou dans laquelle ces atomes prédominent, et qui est susceptible de donner lieu à une combustion en réagissant avec un comburant. Ces atomes se situent à gauche de l'azote dans le tableau périodique (H, C, B, métaux comme Al, Mg, Li...). P et As, qui se trouvent dans la même colonne que l'azote, se comportent comme des combustibles. Alors que l'azote moléculaire joue le plus souvent le rôle d'un constituant inerte, N et S occupent dans la classification périodique des positions limites entre le domaine des atomes prédominant dans les comburants et celui des atomes prédominant dans les combustibles. Suivant les conditions de température et de pression et suivant la nature du co-réactif, ils peuvent se comporter, à l'état élémentaire ou dans des combinaisons, soit comme comburants soit comme combustibles. On utilise les trois formes de combustibles correspondants aux trois états de la matière : *solides, liquides ou gazeux*.

2.1.1. Combustibles solides

Comme combustibles solides, nous avons :

- Les combustibles solides d'origine végétale : bois, déchets de bois (sciures, copeaux), déchets végétaux de l'industrie agroalimentaire, charbon de bois ;
- Les combustibles solides d'origine minérale : anthracites et houilles, lignites (fraîches, séchées, ou broyées,...), coke ;
- Les combustibles solides d'origines diverses : ordures ménagères, déchets industriels.

Les déchets solides peuvent être brûlés sous deux formes essentielles. Chaque forme fixe une architecture différente de la chaudière : forme naturelle (foyer mécanique) et forme pulvérisée (foyer à brûleurs).

2.1.1.1. Foyers mécaniques

Il existe différents types de foyers mécaniques. Les plus utilisés sont les foyers à vis ou à poussoirs et les foyers à grilles mécaniques.

2.1.1.1.1. Foyers à vis ou à pistons

Les foyers à vis ou à poussoirs sont surtout utilisés pour les petites chaudières industrielles (chaudières à tubes de fumées avec déchets industriels).

Dans le foyer à vis, le combustible est introduit par une vis sans fin. L'arrivée permanente du combustible rejette les cendres de part et d'autre du feu sur des plaques de décrassage. Dans le cas du foyer à poussoirs, le combustible arrive sous la couche enflammée par un conduit. Le mouvement alternatif d'un piston fait avancer le combustible. Dans les deux cas, le réglage de l'alimentation en combustible est possible par variation de la vitesse de rotation de la vis, soit par variation de la vitesse du mécanisme d'entraînement du piston.

2.1.1.1.2. Foyers à grilles mécaniques

Les principaux types de foyers à grille mécanique sont :

- les foyers *overfeed* (chargement par-dessus),
- et les foyers *underfeed* (chargement par-dessous).

Mais un type intermédiaire appelé *crossfeed* existe. De tous ces types de foyers, les foyers *underfeed* présentent un intérêt particulier du point de vue de la combustion.

2.1.1.2. Foyers à brûleurs

Les foyers à brûleurs sont des foyers à charbon pulvérisé. L'alimentation des brûleurs se fait directement à partir de broyeurs où se déroule la préparation de charbon pulvérisé.

Les différentes fonctions des brûleurs sont :

- Le dosage de combustible ;
- Le dosage de l'air comburant ;
- Le mélange air - combustible ;
- L'inflammation et le contrôle de l'allumage.

Les foyers modernes à brûleurs sont équipés de brûleurs dits « *turbulents* » dont le rôle consiste à assurer un meilleur mélange par des procédés différents. On peut utiliser, pour les combustibles de forme pulvérisée (charbon pulvérisé), des brûleurs Stein et Roubaix. Ces brûleurs sont nécessairement utilisés par quatre. Ils sont disposés aux quatre coins de la chambre de combustion et assurent une certaine turbulence par la formation d'un tourbillon à axe vertical très favorable à la combustion complète du charbon pulvérisé. Ce type de chauffe est appelé « *chauffe tangentielle* ». La partie terminale de chacun des brûleurs comporte une buse que l'on peut orienter à plus ou moins 30°. Cette possibilité de réglage permet de placer la zone de combustion plus ou moins haute dans la chambre de combustion de la chaudière. Cela permet également de jouer sur la température des

fumées et, par conséquent, de régler la température de surchauffe. Les vitesses d'injection dans ces brûleurs sont assez élevées (jusqu'à 30 m/s) pour favoriser la turbulence. La puissance des brûleurs à pulvérisation mécanique est fixée par le choix du gicleur. Cette puissance dépend de la quantité de fuel que le gicleur peut brûler, donc indirectement de l'air que le ventilateur pourra injecter dans le foyer. La puissance de la chaudière n'est bien évidemment pas celle du brûleur. Celle-ci doit être normalement supérieure à la puissance de la chaudière. Il faut donc déterminer la puissance à fournir par le brûleur à la chaudière connaissant la puissance de la chaudière. Au foyer, la flamme doit normalement remplir la chambre de combustion sans en toucher les parois. Lors de la combustion, un jet de charbon pulvérisé et mélangé avec une partie de l'air primaire sort du brûleur. Il commence par s'échauffer et perd son humidité avant de s'enflammer. La température d'inflammation sera d'autant plus faible que les grains sont plus fins. Elle varie selon les charbons et la grosseur des grains de 170°C à environ 550°C environ. A la sortie du brûleur, il existe une zone de forme conique. Cela permet le réchauffage et l'allumage. On cherche à réduire le volume de cette zone d'allumage. Pour cela, on envoie moins d'air primaire avec le charbon (quantité suffisante d'air primaire pour une combustion complète) et on envoie de l'air secondaire pour éviter les imbrûlés. La préparation du charbon pulvérisé se fait dans des broyeurs qui assurent trois opérations distinctes :

- le séchage du charbon ;
- le broyage des grains ;
- et la sélection des grains de charbon.

Le séchage du charbon est indispensable car le débit d'un broyeur diminue très rapidement lorsque le charbon est humide. Le débit diminue de 50% quand on passe de 2 à 5% d'humidité et de 70% lorsqu'on atteint 8%. Au-delà de cette valeur limite, le broyage devient pratiquement impossible. On introduit de l'air chaud (air primaire) dans le broyeur. Ce système est particulièrement bien adapté aux alimentations directes et permet le broyage du charbon jusqu'à 14% d'humidité. Aussi, un charbon réchauffé présente-t-il l'avantage de s'enflammer plus vite! Cela diminue le volume mort de la chambre mais on est limité dans cette voie par le risque de dépôts à la bouche des brûleurs. On maintient généralement la température du mélange air- charbon du broyeur aux environs de 150°C. L'air sert à la sélection des grains de charbon. Son débit à faible charge n'étant pas le même qu'à pleine charge, la sélection ne sera pas identique. Aussi, un broyeur utilisé à faible charge est-il mal utilisé en raison des pertes de puissance ! Pour pallier cet inconvénient, on utilise un réservoir de stockage. Le réservoir de stockage s'utilise sur les grandes installations. Cette solution est plus chère et plus complexe. La sélection des grains de charbon est favorisée par un débit important d'air. Cela réduit les pertes par imbrûlés, permet également l'arrêt des broyeurs à

faible charge et augment sensiblement le rendement de la chaufferie. Comme types de broyeurs, nous avons par exemples :

- Les broyeurs à boulets adaptés aux charbons durs ou très cendreaux (débit < 10t/h) ;
- Les broyeurs à billes (débit \approx 30 t/h pour les broyeurs à double rangée de billes).

2.1.2. Combustibles liquides

Les fuel-oils et surtout le fuel-oil n°2 sont les plus couramment utilisés comme combustibles liquides dans les chaudières. Tout d'abord, il est nécessaire de réchauffer le fuel. Ce réchauffage s'effectue en plusieurs étapes dans des réchauffeurs. Avant les brûleurs, la température se situe aux environs de 90 à 110°C. Toutes les canalisations sont aussi maintenues à une température convenable par des serpentins sous calorifuge. La consommation de vapeur est relativement importante. Pour une bonne combustion, il faut pulvériser le combustible liquide le plus finement possible. Cette pulvérisation peut être obtenue soit :

- Par la vapeur ;
- Par l'air à haute pression ;
- Mécaniquement ;
- De façon mixte (mécanique + air).

2.1.2.1. Pulvérisation par la vapeur

La pulvérisation par la vapeur est de moins en moins utilisée ; elle consomme jusqu'à 8% de la production. Aussi, la vapeur abaisse-t-elle la température de combustion de 200°C environ !

2.1.2.2. Pulvérisation par l'air

Les brûleurs à pulvérisation par l'air sont également de plus en plus abandonnés car ils absorbent une puissance relativement élevée. Mais ils présentent les avantages suivants :

- Grande souplesse de fonctionnement, le débit pouvant varier de 1 à 6 ;
- Grande vitesse d'éjection du combustible pulvérisé de même que l'air ; cela donne un mélange intime et rapide, donc une excellente combustion.

Les brûleurs à pulvérisation par l'air n'équipent plus que les petites chaudières d'une puissance de vaporisation maximale de 2 à 3 tonnes / h de vapeur. Leur conception est très proche de celle des brûleurs à vapeur.

2.1.2.3. Pulvérisation mécanique

Dans les brûleurs à pulvérisation mécanique, le gicleur va doser le combustible, le pulvériser et le disposer sous forme de brouillard. La densité de brouillard pourra varier suivant le type de gicleur. Le principe de fonctionnement du gicleur consiste à détendre, à travers un orifice de petite dimension, le fuel-oil préalablement mis sous pression par une pompe. Le fuel est aussi animé d'un

mouvement de rotation afin que le jet s'étale dans un espace conique. Cela peut ainsi permettre un meilleur mélange avec l'air.

La finesse de la pulvérisation :

- Augmente avec la pression du circuit de pulvérisation ;
- Diminue avec la viscosité du combustible ;
- Augmente avec la dimension du diamètre du gicleur.

Les brûleurs à pulvérisation mécanique sont alimentés en fuel sous pression de 10 à 40 bars. Ils n'autorisent qu'une variation de charge relativement faible. Néanmoins, les constructeurs ont réalisé permettant d'augmenter les variations de débit. Actuellement, il existe différents modèles de brûleurs à pulvérisation mécanique.

2.1.3. Combustibles gazeux

Comme combustibles gazeux, nous avons les combustibles d'origine naturelle (hydrocarbures naturels) et les combustibles d'origine artificielle (gaz de hauts fourneaux, gaz de fours à coke, gaz de gazogènes, etc.).

D'une manière générale, les combustibles gazeux sont peu utilisés seuls sans la présence dans la chaudière de brûleurs à fuel ou à charbon pulvérisés par exemples. Le plus souvent, les brûleurs à gaz sont ajoutés en complément. Ils sont par conséquent de petites dimensions afin de faciliter leur adjonction aux emplacements les plus favorables.

De nos jours, on équipe de plus en plus les foyers de brûleurs mixtes (fuel – charbon pulvérisé, fuel – gaz – charbon pulvérisé). Cela permet de pouvoir utiliser selon la conjoncture économique, des combustibles différents. Mais il n'est possible d'adapter parfaitement un générateur à plusieurs combustibles en raison de :

- leurs rayonnements différents ;
- leurs débits massiques de fumées différents ;
- leurs chaleurs massiques de fumées différentes.

Par conséquent, on est obligé dans ce cas de réaliser un compromis au détriment de l'économie des surfaces.

2.1.4. Influence du combustible sur les chaudières

Il faut noter que le débit de combustible influe sur les performances des chaudières. Ainsi, des débits faibles entraînent des rendements élevés. Nous pouvons avoir une gamme de puissance thermique assez large dans une chaudière ; la plus petite puissance va correspondre au débit le plus faible et la plus grande au débit le plus élevé. Mais en pratique, il faut empêcher que le débit faible n'entraîne une température très modérée des fumées dans la cheminée. Cela pourrait entraîner un risque de condensation des fumées dans le conduit de la cheminée. Comme dans ce cas, la température des fumées dans le foyer n'est pas assez élevée, la combustion du combustible ne peut

pas être complètement assurée. Cela conduit à une baisse de rendement dû à l'imbrûlé. Par contre, les débits très élevés de combustible entraînent une vitesse des fumées et des pertes de charge excessives. Aussi, les températures des fumées à l'entrée de l'échangeur sont-elles assez élevées pour endommager le faisceau de tubes par exemple. La nature du combustible utilisé dans une chaudière conditionne la construction de cette chaudière. Elle influe aussi sur le mode d'exploitation et sur la conception de l'automatisme.

Néanmoins, de nos jours, il est possible de construire des chaudières polyvalentes permettant l'emploi de divers combustibles dans le même foyer.

2.2. Caractéristiques physicochimiques des combustibles

Un certain nombre de paramètres issus des analyses aussi bien physiques que chimiques voire physico-chimiques permettent de caractériser les combustibles quelle que soit leur forme. Il s'agit de :

- L'analyse qualitative et l'analyse élémentaire quantitative du combustible ;
- La masse volumique et parfois la viscosité notamment pour les liquides et gaz ;
- Le pouvoir calorifique déterminé par le calcul et par la bombe calorimétrique ;
- Le besoin en oxygène et en air ;
- La teneur maximale en CO₂ des gaz brûlés ;
- La température de point d'éclair ou point d'inflammabilité (température à laquelle le mélange air-combustible s'enflamme à l'approche d'une flamme ou encore la température minimale à laquelle un combustible liquide présente des vapeurs inflammables) ;
- La température d'inflammation (température à laquelle le mélange air -combustible s'enflamme spontanément) ;
- Les limites d'inflammabilité c'est-à-dire l'intervalle des concentrations de combustible dans l'air à l'intérieur duquel le mélange air- combustible est inflammable.

En réalité, on s'intéresse surtout aux caractéristiques énergétiques des combustibles.

2.2.1. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique PC constitue l'une des caractéristiques essentielles d'un combustible. C'est la quantité de chaleur produite par la combustion complète et parfaite de l'unité de masse (ou de volume) de ce combustible dans les conditions normales de température et de pression. L'analyse élémentaire du combustible, qui consiste en la connaissance des proportions (en pourcentage notamment) des différents éléments chimiques constitutifs du matériau, permet de déterminer son pouvoir calorifique. D'après cette analyse, on peut relever la composition de ce combustible. On mesure les proportions du carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), d'azote (N) et de soufre (S). L'hydrogène contenu dans le combustible se combine avec de l'oxygène durant la combustion

et produit de l'eau H₂O. Les gaz brûlés résultant de la combustion contiennent donc de l'eau. Selon le refroidissement subi par ces gaz brûlés, cette eau peut être sous phase liquide ou sous phase vapeur. On est alors en présence de deux pouvoirs calorifiques : le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI). Deux approches sont adoptées dans la détermination du pouvoir calorifique : il s'agit de l'approche consistant à déterminer le pouvoir calorifique par le calcul et de l'approche utilisant la mesure expérimentale.

2.2.1.1. Détermination du pouvoir calorifique par calcul

A partir de l'analyse élémentaire, en utilisant la formule de Dulong, on peut calculer le pouvoir calorifique supérieur (PCS) d'un combustible avec une précision acceptable.

- Pour les combustibles solides,

$$PCS = 81,4 \times C + 345 \times H - 30 \times (O + N) \text{ en kcal/kg}$$

avec : C la teneur brute de carbone total en % ;

H la teneur brute d'hydrogène en % ;

O la teneur brute d'oxygène en % ;

N la teneur brute d'azote en % ;

S la teneur brute de soufre en %.

- Pour le fuel :

$$PCS = 77 \times (C + 3,5 \times H + 0,27 \times S) \text{ en kcal/kg.}$$

Pour des raisons de préventions de la corrosion côté fumées, la température des gaz brûlés est supérieure à 100°C à leur sortie de la chaudière. L'eau produite par la combustion reste alors sous phase vapeur. Par conséquent, elle n'a pas cédé sa chaleur latente de condensation ; ce qui diminue la quantité de chaleur cédée par les gaz brûlés. Nous aurons alors presque recours au PCI. Par convention, le PCI s'obtient en déduisant du PCS, 600 kcal/kg de H₂O. Cela correspond environ à la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

$$PCI (\text{à } T^{\circ}C) = PCS (\text{à } T^{\circ}C) - m \times L_v (\text{à } T^{\circ}C)$$

avec : m : masse de l'eau de formation,

L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau.

* **Chaleur latente de vaporisation de l'eau : L_v = 540 kcal/kg à 100°C**

En fait, L_v dépend de la température. Les valeurs correspondantes sont données dans le tableau 8.

Tableau 8 : Chaleur latente de vaporisation en fonction de la température

Température (°C)	Lv en kcal/kg	Température (°C)	Lv en kcal/kg	Température (°C)	Lv en kcal/kg
0	594,8	70	557,1	180	481,2
5	592,2	75	554,1	190	470,7
10	589,5	80	551,1	200	461,2
15	586,9	85	548,0	210	453
20	584,3	90	545,0	220	443,2
25	581,7	95	541,9	240	421,9
30	579,2	100	539,7	270	382,9
35	576,6	110	532,1	300	336,1
40	574,0	120	525,3	310	314
45	571,3	130	518,2	330	271,8
50	568,5	140	510,9	350	213,0
55	565,7	150	503,8	370	107,0
60	562,9	160	496,6	374	0 (tempé. critique)
65	560,0	170	489,4		

On peut également utiliser la formule de REGNAULT qui donne approximativement la chaleur latente de vaporisation L_V de l'eau pour des températures Θ comprises entre 0 et 200°C :

$$L_V = 606,5 - 0,695 \cdot \theta \quad L_V \text{ en kcal/kg et } \theta \text{ en } ^\circ\text{C}.$$

Le pouvoir calorifique inférieur PCI est donné aussi par la relation suivante :

$$PCI = PCS - (6 \times H_2O + 54H_2) \text{ en kcal/kg.}$$

avec : $6 \times H_2O + 54H_2$: la chaleur dépensée dans le foyer par la vaporisation de l'eau en pure perte. La teneur en eau et en cendres des combustibles liquides est toujours très faible. Il n'est pas utile d'en tenir compte dans la détermination du pouvoir calorifique de ces combustibles.

Ainsi, en l'absence d'eau de combustion, nous aurons :

$$PCI = PCS - 54 \times H_2 \text{ en kcal/kg}$$

Il faut souligner qu'il existe, dans la littérature, de nombreuses autres relations pour le calcul approché des pouvoirs calorifiques des combustibles à partir des proportions de leurs constituants déterminées par l'analyse élémentaire.

Pour les calculs pratiques, les relations les plus utilisées pour la détermination du PCI sont:

- Pour les combustibles solides et liquides :

$$PCI = 33,8 \times c + 12 \times \left(h - \frac{o}{8} \right) - 2,5 \times w \quad \text{en MJ / kg}$$

- Pour les combustibles gazeux :

$$PCI = 12,64(\%co) + 10,95(\%h_2) + 35,83(\%ch_4) + 75,34(\%C_mH_p) \quad \text{en MJ/Nm}^3$$

En outre, pour des calculs plus rigoureux, la détermination du pouvoir calorifique des combustibles doit intégrer les teneurs en eau et en cendres notamment avec les combustibles assez riches en cendres.

2.2.1.2. Détermination du pouvoir calorifique par la méthode calorifique

La détermination du pouvoir calorifique par cette méthode utilise la bombe calorimétrique. La figure ci après décrit le principe de la mesure du pouvoir calorifique au moyen de la bombe calorimétrique de Mahler. La figure présente les différentes parties essentielles de la bombe calorimétrique de type Mahler. Au point de vue du fonctionnement, il faut souligner qu'il existe très peu de différences par rapport aux autres types de bombes calorimétriques. Il convient de préciser que le pouvoir calorifique déterminé au moyen des bombes calorimétriques est le pouvoir calorifique supérieur à volume constant PCSv.

Pour revenir au pouvoir calorifique inférieur à pression constante PCIp ou PCI tout court d'usage courant, il faut procéder à deux corrections.

1. La correction n°1 correspond au passage du PCSv au PCSp.

Elle se réalise au moyen de l'application de la relation suivante :

$$PCSp = PCSv + 135 \times \left(h - \frac{o}{8} \right)$$

avec : p et v : les indices désignant des mesures respectivement à pression constante et à volume constant ;

h et o : les teneurs respectives en hydrogène et oxygène du combustible fournies par l'analyse élémentaire.

2. La correction n°2 correspond au passage du PCSp au PCIp ou PCI

Le PCSp inclut la chaleur libérée par la condensation de l'eau formée au cours de la réaction ; pour obtenir PCIp ou PCI, il faut alors appliquer la relation :

$$PCI = PCIp = PCSp - Q_e$$

La quantité de chaleur correspondante à l'eau produite durant la réaction est donnée, connaissant la composition massique du combustible, par :

- Pour les combustibles solides et liquides :

$$Q_{es,L} = 600 \times (9 \times h + w) \quad \left(\frac{kcal}{kg} \right)$$

- Pour les combustibles gazeux :

$$Q_{eG} = 480 \times (h_2 + h_2 o + 2 \times ch_4 + 2,45 \times \sum c_m h_p) \quad (kcal/Nm^3)$$

2.2.1.3. Procédure de la mesure

Soient m : la masse de l'échantillon du combustible à tester (g) ;

m_t : la masse de la spirale de fer servant à déclencher l'inflammation c'est-à-dire la résistance électrique (g) ;

M : la masse d'eau contenue dans le calorimètre (g) ;

M_1 : la valeur en eau des accessoires du calorimètre, bombe elle-même comprise (g) ;

T_1 : la température initiale de l'eau du calorimètre, les robinets étant fermés (°C)

T_f : la température finale de l'eau du calorimètre, les corrections thermométriques étant effectuées (°C) ;

V : le volume de la solution décimale de soude caustique nécessaire à la neutralisation du liquide (eau acidulée) de la bombe (cm³).

Le PCS_v est donné par la relation

$$PCS_v = \frac{(M + M_1)(T_f - T_i) - (1600 \times m_1 + 3V)}{m}$$

Exemple d'application

Une expérience de détermination du pouvoir calorifique du charbon a donné les valeurs suivantes :

$m=1,02167g$; $m_1=0,02g$; $M=2604g$; $M_1=698g$; $V=7cm^3$; $T_i=20,454^\circ C$; $T_f= 22,706^\circ C$

Calculer le PCS ainsi mesuré à travers cette expérience.

Réponse: Il faut simplement ici remplacer les paramètres par leurs valeurs; on a :

$$PCS_v = \frac{(2604 + 698)(22,706 - 20,454) - (1600 \times 0,02 + 3 \times 7)}{1,02167}$$

$$PCS_v = 7226 \text{ (cal/g ou kcal/kg)}$$

2.2.2. Pouvoir calorifique net PCN

Il est connu que toute l'énergie potentiellement disponible dans le combustible n'est pas utilisable.

On définit alors le PCN comme étant la quantité effective de chaleur utile dégagée par la combustion complète de l'unité de masse (1kg) ou de volume (Nm³) de combustible. Le PCN se calcule par la relation :

$$PCN = PCI \times (1 - 1,2 \times w) \frac{kcal}{kg} \text{ ou } \frac{kcal}{kg} \text{ ou } kcal/Nm^3$$

Pour extraire cette quantité de chaleur au combustible, il faut mettre en jeu une quantité théorique d'air que l'on définit comme étant la quantité d'air stœchiométrique ou encore le pouvoir comburivore du combustible.

Le pouvoir comburivore d'un combustible : A_o

On définit alors le pouvoir comburivore du combustible comme étant la quantité d'air nécessaire à la combustion stœchiométrique c'est-à-dire combustion complète dans les conditions normales de pression et de température (760 mm Hg et 0°C) de l'unité de masse (le kg) ou de volume (le Nm³) de combustible.

Il se détermine par le calcul, à partir de la connaissance de la composition du combustible, par les relations ci après :

- Pour les combustibles solides et liquides :

$$A_o = \frac{22,4}{0,21} \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s - o}{32} \right) \text{ en Nm}^3/\text{kg}$$

- Pour les combustibles gazeux :

$$A_o = \frac{1}{0,21} \left(\frac{co}{2} + \frac{h_2}{2} + 2ch_4 - o_2 + 3,67 \sum c_m h_p \right) \text{ en Nm}^3/\text{kg}$$

En réalité, cette quantité d'air théorique n'est jamais réalisée de façon stable en pratique ; la combustion effective se déroule soit avec un excès d'air ou à défaut d'air.

2.2.3. Pouvoir fumigène d'un combustible P_r

On définit le pouvoir fumigène d'un combustible comme étant la quantité de fumées produites par la combustion stœchiométrique c'est-à-dire combustion complète dans les conditions normales de pression et de température (760 mm Hg et 0°C) de l'unité de masse (le kg) ou de volume (le Nm³) de combustible.

2.2.3.1. Pour un combustible solide ou liquide

Les équations de combustion stœchiométriques permettent d'écrire, pour l'unité de masse (le kg) de combustible brûlé dans de l'oxygène, les quantités suivantes, pour les produits gazeux formés durant la combustion complète du combustible sec :

- C / 12 kmol de CO₂
- h / 2 kmol de H₂O
- n / 28 kmol de N₂
- s / 32 kmol de SO₂

soit un volume total de produits gazeux égal à :

$$V_{P_{sec}} = 22,4 \times \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{2} + \frac{n}{28} + \frac{s}{32} \right) \text{ Nm}^3/\text{kg}_{comb}$$

A ce volume, il faut ajouter l'azote contenu dans l'air de comburant et qui vaut 3,76 fois le volume d'oxygène V_{O_2} ; ainsi, le volume à ajouter est donc :

$$V_{N_2} = 3,76 \times 22,4 \times \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{o}{32} + \frac{s}{32} \right) \text{ Nm}^3/\text{kg}_{comb}$$

Si le combustible renfermait une teneur en eau w , il faudrait encore ajouter un volume de vapeur d'eau égal à :

$$V_{H_2O} = 22,4 \times \frac{w}{18} \text{ Nm}^3/\text{kg}_{comb}$$

La combustion du kg de combustible aurait en définitive produit une quantité de fumées égale à la somme P_F des volumes gazeux ci-dessus énumérés, soit :

$$P_F = V_{P_{sec}} + V_{N_2} + V_{H_2O}$$

$$P_F \approx 8,889 \times c + 32,227 \times h + 3,333 \times s + 0,8 \times n + 1,245 \times w - 2,633 \times o$$

$\text{Nm}^3_{fumées}/\text{kg}_{comb}(\text{sol. liq})$

avec : c, h, o, s, w, n : les teneurs massiques des éléments chimiques correspondants.

2.2.3.2. Pour un combustible gazeux

Une démarche analogue à la précédente permet d'aboutir à l'expression du pouvoir fumigène pour un combustible gazeux. Elle est calculée par :

$$P_F = w + h_2 + co + 3ch_4 + n_2 + 3,76V_{O_2} + 4,90 \sum c_m h_p \text{ Nm}^3_{fumées}/\text{kg}_{comb\ gaz}$$

avec cette fois : $w, h_2, co, co_2, ch_4, n_2, c_m h_p$: les fractions volumiques des substances chimiques correspondantes./

La combustion est l'ensemble des réactions chimiques globalement et généralement fortement exothermiques, autonomes, susceptibles de s'accélérer brutalement et d'être accompagnées d'émission de rayonnements appelés flammes.

Une combustion peut être lente (phase du processus qui précède l'éventuelle accélération brutale de la réaction) ou vive (phase du processus débutant avec l'accélération brutale et caractérisée par une vitesse réactionnelle élevée). Selon les conditions de confinement, le dégagement de chaleur de la réaction de combustion peut conduire à une expansion rapide du milieu réactionnel ou à une forte augmentation de pression. L'émission de rayonnements se situe généralement, au moins en partie, dans le visible, le proche UV et le proche IR. L'accélération brutale caractéristique de la combustion vive peut conduire à la formation d'une flamme. On peut aussi observer l'émission de fumée avec ou sans incandescence. Une combustion peut libérer des espèces chargées : électrons, ions négatifs ou positifs. Une combustion réalise donc une conversion d'énergie chimique potentielle en énergie thermique, mécanique, rayonnante, électrique. Cette conversion peut être utilisée, directement ou indirectement, pour le chauffage, la propulsion, la production d'électricité.

Dans le sens usuel, la combustion est la réaction entre un combustible et l'oxygène pur, l'oxygène dilué (air) ou une espèce chimique riche en oxygène (ozone, peroxyde d'hydrogène, acide nitrique). On appelle aussi combustions des réactions très exothermiques entre divers combustibles et des comburants partiellement oxygénés (F_2O , Cl_2O , ClO_2) ou non oxygénés (F, Cl, Br, composés riches en F ou en Cl, comme ClF_3). Des décompositions très exothermiques d'espèces chimiques endothermiques (acétylène, hydrazine, ozone, bioxyde de chlore, azotures, trichlorure d'azote) peuvent aussi être appelées combustions.

Dans le domaine de la propulsion, la normalisation française définit la combustion comme la réaction chimique exo énergétique entre un réducteur et l'oxygène ou un autre corps électronégatif. La combustion est la réaction chimique entre un combustible et un comburant avec production de chaleur. Généralement la combustion entraîne l'apparition d'une flamme ou de la lumière.

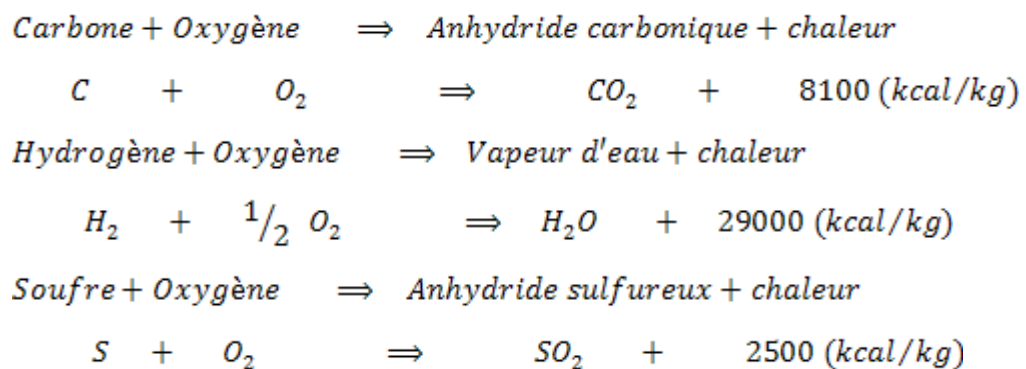
Une flamme est un milieu réactionnel gazeux (les liquides et solides doivent en général être gazéifiés avant de brûler), hautement énergétique et de volume limité, où se produisent et se soutiennent mutuellement des réactions chimiques, des phénomènes de diffusion d'espèces chimiques et de chaleur, ainsi que des émissions lumineuses. La combustion, par la combinaison d'un combustible et d'un comburant, provoque la formation des gaz de combustion (ou gaz brûlés ou fumées). Ce sont des gaz de combustion qui parcourent la chaudière en lui cédant leur chaleur avant d'être évacués par la cheminée. Une réaction chimique produisant de la chaleur porte le nom

de réaction exothermique. Une réaction chimique absorbant de la chaleur est dite réaction endothermique. Nous excluons de tout ce qui suit les réactions lentes pour ne parler que des réactions vives. Dans les chaudières et les fours industriels, la combustion s'effectue à pression constante et non à volume constante comme dans une bombe calorimétrique.

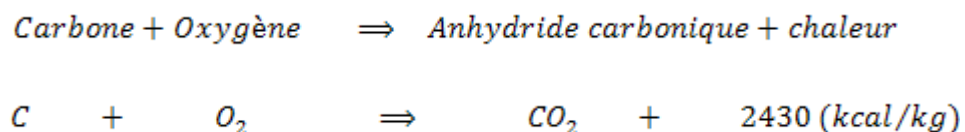
3.1. Equation de combustion

La quantité de chaleur produite par la combustion du combustible (carbone, hydrogène et soufre) se calcule à l'aide des équations chimiques correspondantes. L'oxygène nécessaire à la combustion est apporté par l'air extérieur amené dans le foyer. Selon cette quantité d'air, la combustion peut être complète ou incomplète. Dans le cas où la combustion est complète, la quantité d'air (donc d'oxygène) est suffisante et égale à celle théoriquement nécessaire. C'est la combustion neutre ou encore combustion stœchiométrique.

Les équations de combustion s'écrivent alors :



Dans le cas de la combustion incomplète, la quantité d'air (donc d'oxygène) est insuffisante donc inférieure à celle théoriquement nécessaire. Il se produit alors une combustion incomplète du carbone selon l'équation chimique suivante !



La production de chaleur n'est plus que d'environ 30% de celle obtenue par la combustion complète. La production de CO présente un très grave danger pour ceux qui travaillent dans la chaufferie.

3.2. Conditions requises pour la combustion

Pour qu'une combustion puisse s'établir et se maintenir, plusieurs conditions doivent être respectées. Comme conditions essentielles, nous avons :

- Un apport régulier de combustible ;
- L'échauffement du combustible jusqu'à la température d'inflammation ;

- Un mélange aussi intime que possible entre combustible et comburant ;
- Un apport régulier d'oxygène, donc d'air ;
- L'évacuation régulière des gaz de combustion.

La réalisation pratique de ces conditions dépend surtout de la nature du combustible et du type de chaudière.

3.3. Besoins de la combustion

La combustion demande un apport régulier de combustible et d'oxygène. Sans un apport de combustible, il n'y a pas de combustion et sans de l'oxygène, il n'y a pas de combustion. La combustion d'un combustible nécessite une certaine quantité d'oxygène par kg afin qu'elle soit complète. Cette quantité d'oxygène Oxygène Minimum est calculée sur la base de l'analyse du combustible. La quantité d'air théoriquement nécessaire à la combustion complète d'un kilogramme ou d'un mètre cube de combustible est la quantité théorique L_{th} exprimée en m^3/kg . Lorsque le combustible est complètement brûlé avec la quantité d'air théorique, les gaz brûlés ont la teneur maximum en CO_2 , le CO_{2max} .

Mais en pratique, le mélange combustible- comburant n'est pas aussi complet que sur le plan théorique. Il est impossible d'obtenir un réglage parfait car le mélange air- combustible est imparfait et l'on risque l'apparition d'imbrûlés. Pour compenser ce fait, il est nécessaire de fournir à la combustion une quantité d'air effective L_{eff} plus grande que la quantité théorique. La combustion oxydante consiste à n'envisager pratiquement la combustion complète d'un combustible qu'avec un certain excès d'air. Mais un excès d'air important entraîne une diminution du rendement des chaudières ou des fours et une augmentation des imbrûlés. La combustion mi-oxydante consiste à limiter l'excès d'air à la valeur la plus faible compatible avec l'apparition des imbrûlés gaz en raison de la baisse du rendement des appareils consécutive à l'emploi de la combustion oxydante.

Aussi, la géométrie du brûleur et de la chambre de combustion ont-elles une très grande importance sur cette limite inférieure de l'excès d'air. En fait, la combustion réelle est le plus souvent caractérisée par la présence simultanée, dans les fumées, d'oxygène en excès et d'imbrûlés gazeux.

Le **coefficient d'excès d'air λ** est ainsi défini :

$$\lambda = \frac{\text{quantité d'air effective}}{\text{quantité d'air théorique}} = \frac{L_{eff}}{L_{th}}$$

$$\lambda = 1,3 \text{ à } 1,6 : \text{Charbon}$$

$$\lambda = 1,1 \text{ à } 1,4 : \text{Huiles fuel } 1, 2, \dots \dots$$

$$\lambda = 1,0 \text{ à } 1,2 : \text{Gaz.}$$

La quantité d'air effective à apporter pour une combustion peut être introduite en une seule fois (air primaire seulement) ou deux fois (air primaire et air secondaire).

Dans le second cas, nous avons les possibilités favorables rassemblées dans le tableau :

	Air primaire	Air secondaire
Combustible solide	Sous la grille	Au dessus de la grille
Combustibles liquide et gazeux	Dans le brûleur	En dehors du brûleur

3.4. Produits de la combustion

Les produits de la combustion sont de deux sortes :

- ❖ Les gaz de combustion (CO_2 , CO , SO_2 , HO_2 , C_mH_p , N_2 de l'air n'ayant pas participé à la combustion, cendres volatiles, poussières et fumerons évacués par la cheminée);
- ❖ Les résidus solides (suies sèches ou grasses, cendres, scories, et mâchefers, imbrûlés solides) qui restent dans le foyer. Ces résidus doivent être évacués très régulièrement, en particulier la suie dont la présence sur les surfaces de chauffe abaisse considérablement la transmission de chaleur et le rendement global de la chaudière.

3.5. Dangers de la combustion

La combustion incomplète provoque la production de monoxyde de carbone (CO). Ce gaz est très toxique. S'il se répand dans les locaux de travail, il peut être la cause d'intoxication grave et même mortelle par sa fixation sur l'hémoglobine du sang pour une concentration de 6% en volume dans l'air et une durée d'exposition de deux heures et demie. Aussi peut-il s'enflammer si sa concentration dans l'air se situe entre 12,5 et 74,2% en volume et être à l'origine d'une explosion ! Il faut éviter du possible la production du CO . Les locaux où un tel gaz peut se produire ou pénétrer doivent être énergiquement ventilés. En cas d'intervention, un masque à gaz de modèle normal (à filtre) est inefficace. Il est nécessaire d'utiliser des masques avec réservoir d'air en apport extérieur d'air.

3.6. Contrôle de la combustion

La qualité d'une combustion dépend, pour un combustible, du coefficient d'excès d'air λ et de la teneur des divers constituants des gaz de combustion (CO_2 , CO et O_2).

Le contrôle de la combustion porte surtout sur la teneur de ces divers paramètres. Il porte aussi sur les calculs effectués à partir de ces mesures et qui permettent d'établir le rendement global de la chaudière. Ces mesures sont faites sur les gaz de combustion à la sortie de la cheminée. En raison de l'imperfection de la combustion, les gaz ont une teneur en CO_2 inférieure à la teneur maximale théorique $\text{CO}_{2\text{max}}$ pour une combustion complète avec exactement la quantité d'air théorique suivant le processus parfait. Par conséquent, il est nécessaire de mesurer la quantité réelle en CO_2 des gaz de combustion pour connaître la qualité de la combustion. La notation approximative suivante donne le coefficient d'excès d'air λ en fonction de $\text{CO}_{2\text{max}}$ et de CO_2 mesuré :

$$\lambda = \frac{\text{CO}_{2\text{max}}}{\text{CO}_2}$$

- La teneur en CO caractérise la quantité d'air effective apportée pour la combustion. Si elle est suffisante, la teneur en CO est nulle ; si elle est insuffisante, les gaz de combustion contiennent du CO
- La teneur en O₂, qui dépend aussi des autres paramètres de combustion, indique également si l'excès d'air est convenable.
- La mesure de la température de sortie des gaz permet de déterminer la perte de chaleur sensible pour les gaz évacués par la cheminée.
- Le test d'opacité des fumées constitue une mesure relative des produits solides en suspension dans les gaz de combustion (poussières, cendres, fumerons). Il permet de connaître la pollution de l'air créée par la combustion soumise au contrôle.

Il est important de connaître la dépression régnant dans le foyer d'une chaudière. Cette mesure s'effectue avec un manomètre à membrane ou à colonne de liquide (eau). La détermination des teneurs en CO₂, CO, et O₂ est faite de manière volumétrique. La méthode d'analyses est basée sur l'absorption du constituant à doser dans un réactif chimique spécifique. Cette absorption est mesurée d'une manière volumétrique; ce qui donne directement le résultat cherché. Ces analyses de dosage d'une façon générale, nécessitent précision, doigtée et patience. Elles requièrent aussi des appareils en parfait état de marche : appareil ORSAT, appareil FYRITE – BACHARAH, appareil DRAGER, appareils automatiques, etc. En pratique, il est possible d'établir des diagrammes de combustion liant graphiquement entre eux, les 4 paramètres (λ , CO₂, CO, et O₂) afin de diminuer le nombre de mesures à effectuer. La construction de ces diagrammes dépend de la composition du combustible. Comme diagrammes existants, nous avons ceux d'OSTWALD, VERON–BUNTE, BOSNAKOWICZ, etc.

3.7. Efficacité de la combustion

- ❖ L'efficacité de la combustion est un paramètre qui ne dépend pas seulement du degré auquel la réaction de combustion a été réalisée, mais aussi de l'humidité du combustible, de l'homogénéité entre le combustible et le comburant ainsi que de l'excès d'air nécessaire à l'accomplissement de la combustion.

Nous ne pouvons pas parler de combustion en laissant le bilan thermique d'une chaudière.

3.8. Réglage de la combustion

Régler la combustion, c'est essentiellement régler le débit d'air. S'il est trop faible, une partie du combustible ne sera pas brûlée et le générateur perdra de la puissance. S'il est trop élevé, la température de la flamme diminuera. Les deux grandeurs essentielles à surveiller sont la teneur des

fumées en imbrûlés et en gaz carbonique (CO₂). De nombreuses méthodes sont applicables pour effectuer ces mesures. Elles se basent sur les deux types d'appareils utilisant :

- Les uns, des réactions chimiques (CO₂, et éventuellement O₂) ;
- Les autres, l'observation de grandeurs physiques (indice de noircissement).

La présence d'imbrûlés dans les fumées, si elle indique toujours une combustion incomplète, peut avoir d'autres causes :

- Le débit d'air est insuffisant (cas le plus fréquent) ;
- Le fuel est mal pulvérisé ou le mélange comburant- combustible est mauvais ;
- La flamme, mal centrée, touche une paroi froide.

Les limites théoriques de réglages des teneurs en CO₂ des fumées sont :

- ⌘ Fuel : CO₂ = 16,5 %
- ⌘ Gaz naturel : CO₂ = 11,6 %

Le réglage de la combustion, même parfait, n'est pas stable dans le temps. Le responsable de chaufferie (conducteur de chauffe ou chauffeur) doit alors instituer son contrôle périodique et systématique. Le contrôle régulier du réglage a un effet immédiat sur la facture énergétique de l'entreprise.

Comparons des résultats obtenus dans 3 cas de fonctionnement (1- manque d'air; 2- fort excès d'air ; 3- bon réglage) d'une chaudière de 500 T/h consommant 2500 MWh de gaz à une allure moyenne de 50%.

Conditions de fonctionnement	Unités	Cas 1 Manque d'air	Cas 2 Fort excès d'air	Cas 3 Bon réglage
Température des fumées	°C	230	230	230
CO ₂ dans les fumées	%	10	6	10
Imbrûlés CO	%	1,5	0	0
H ₂	%	1,2	0	0
Température d'air	°C	10	10	10
Rendement du générateur				
Pertes par imbrûlés	%	8,4	0,0	0,0
Autres pertes aux fumées	%	9,0	15,6	10,2
Pertes par les parois	%	4,0	4,0	4,0
TOTAL DES PERTES	%	21,4	19,6	14,2
Rendement par différence	%	78,6	80,4	85,8

Bilan pour 4000 h				
Consommation annuelle	MWh	2729	2668	2500
Différence de consommation	MWh	229	168	-

L'écart de performance entre le meilleur responsable de chaufferie et le moins bon est généralement de 10 % à 15 %. Il peut même être plus important sur les chaudières à charbon. Il est alors nécessaire d'employer à la chaufferie un personnel de conduite parfaitement formé (qualifié).

La tenue d'un livret de chaufferie est obligatoire pour toute installation consommant plus de 1000 th/h. en plus de certaines caractéristiques techniques sur les générateurs et les locaux, ce livret doit comporter des indications sur le fonctionnement général de l'installation, sur les appareils de contrôle, sur les contrôles effectués et sur les incidents et les opérations d'entretien. Le livret de chaufferie fourni des renseignements d'autant plus utiles que la personne qui le tient est plus compétente. Le brûleur est l'organe de chargé de réaliser toutes les conditions pour que la combustion soit bonne. Le brûleur doit être régulièrement entretenu. Les perfectionnements actuels des brûleurs visent à obtenir un fonctionnement sans imbrûlés avec des excès d'air de plus en plus faibles. Les constructeurs ont donc amélioré les dispositifs aérodynamiques qui assurent le mélange air- combustible. Le remplacement d'un brûleur ancien par un modèle plus moderne peut alors entraîner des économies considérables de combustibles. Mais un changement de brûleur entraîne la révision de tous les réglages. Inversement, la remise en cause des réglages peut déboucher sur la nécessité de changer le brûleur. Il est rare qu'une chaudière fonctionne en permanence à sa puissance nominale. Aussi est-il nécessaire de faire varier la puissance de l'ensemble brûleur-chaudière pour l'adapter à la demande en chaleur du circuit d'eau, d'air ou de vapeur suivant le cas. La puissance de la chaudière n'est pas celle du brûleur mais celle qui est directement utilisable par le circuit d'eau, d'air ou de vapeur de cette chaudière. Ces deux puissances sont liées par l'expression du rendement. La puissance du brûleur est fixée par le choix du gicleur./

L'établissement du bilan thermique d'une chaudière consiste à mesurer et à calculer les paramètres de fonctionnement afin de pouvoir établir le rendement global. Ces paramètres mesurés vont servir à conduire au mieux la chaudière en vue d'une exploitation optimale.

4.1. 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 (Qu) ;
- les chaleurs perdues (Qp).

$$Q = Qu + Qp$$

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

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

Si $Q_{imb} = 0$ alors :

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

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

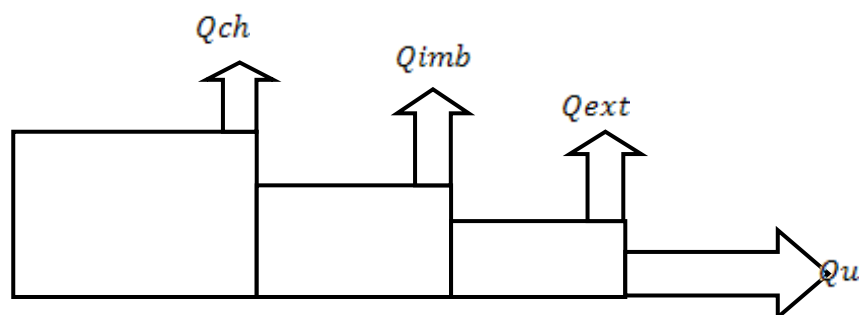


Figure n° 20 : Schéma de principe du bilan thermique d'une chaudière

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

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

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

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 volumique 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

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

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

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

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).

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

avec $Z = 60$ pour le charbon

$Z = 60$ pour le lignite

$Z = 60$ pour l'huile

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

* $P_{imb}(\%Q_{ch}) = \%Q_{imb\ gazeux} + \%Q_{ch}$ 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.

4.2. 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.

4.2.1. 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.

4.2.2. 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.

4.3. 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./

L'eau de chaudière provient de la station de traitement, de la bache de récupération des condensas, du dégazeur, l'appoint en eau dans la chaudière est réalisé grâce à une pompe alimentaire (souvent doublée) fonctionnant à une pression légèrement supérieure à la pression interne du ballon. Extraction et purge continue sont deux opérations contribuant à maintenir la qualité de l'eau dans la chaudière, paramètre essentiel pour le bon fonctionnement de l'installation.

L'eau d'alimentation contient des traces de produits de traitement, de sels minéraux et d'impuretés diverses ; les résidus se déposent au fond du ballon sous forme de boues et doivent être évacués à l'aide d'un robinet d'extraction. Ce robinet spécial, dont la manoeuvre doit être :

- brutale,
- de courte durée (afin d'éviter d'entraîner trop d'eau avec les boues),
- répétée plusieurs fois par jour,

est généralement soit un robinet manuel équipé d'un levier allongé et d'un ressort de rappel en fermeture, soit un robinet ¼ tour automatisé.

Dans un souci d'économies d'énergie, la vapeur de vaporisation, qui se forme lors de l'évacuation de l'eau chaude chargée dans ce que l'on appelle le pot de débouillage, peut être récupérée et envoyée dans un dégazeur, à température et pression faibles. Les boues et eau excédentaire sont par ailleurs évacuées après refroidissement.

Les produits de traitement et sels minéraux, arrivant avec l'eau d'alimentation et ne partant pratiquement pas avec la vapeur produite, ont tendance à se concentrer dans le ballon, qu'ils soient en solution ou en suspension. D'où la nécessité de procéder à une purge de déconcentration permanente, grâce à un robinet de dégazage spécial, à très faible débit.

Le prélèvement continu se fait à environ 10,0 cm sous le plan d'eau, le dispositif pourra être mis à profit pour réaliser une prise d'échantillon pour analyse, après refroidissement.

Par ailleurs, la vapeur de re-vaporisation pourra être récupérée et réutilisée. Les problèmes connus pour tout échangeur véhiculant l'eau ou la vapeur d'eau sont essentiellement de deux ordres :

- La formation de dépôts qui ont pour conséquence la réduction de la capacité d'échange des surfaces sur lesquelles ils se déposent, cela pouvant aller jusqu'au colmatage total,
- La corrosion pouvant aboutir à la détérioration partielle ou totale de l'échangeur.

Un suivi permanent de la qualité de l'eau d'alimentation de la chaudière revêt alors une importance capitale pour le bon fonctionnement et la durée de vie de la chaudière. Ce suivi, qui passe par l'analyse continue de l'eau, constitue aussi le meilleur gage de durabilité pour toutes installations de chaufferie raccordées à la même chaudière. En effet, nous devons d'ores et déjà avoir présent à

l'esprit qu'une eau, même la très propice à la consommation humaine, n'a pas les caractéristiques requises pour l'alimentation des chaudières.

Les phénomènes d'entartrage, d'encrassement et de corrosions liés à la composition et à l'utilisation de l'eau sont inévitables. Elle doit donc subir le traitement adéquat avant son introduction en chaudière.

5.1. Quelques définitions

➤ Le Titre Alcalinimétrique (TA) :

Le TA est la mesure de la teneur en ions hydroxydes (OH^-) et carbonates (CO_3^{2-}) d'une eau. Il est représenté par l'équation :

$$\text{TA} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$$

➤ Le Titre Alcalinimétrique Complet de l'eau (TAC) :

Il mesure la teneur en ions hydroxydes (OH^-), carbonates (CO_3^{2-}) et bicarbonates d'une eau et est représenté par l'équation :

$$\text{TAC} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-]$$

➤ Le Titre Hydrotimétrique de l'eau (TH) :

Le TH est défini comme étant la somme des concentrations calcique et magnésienne i. e. de la dureté calcique et de la dureté magnésienne ; le TH mesure en définitive la dureté totale de l'eau.

La dureté de l'eau est principalement causée par la présence de certains sels. La dureté est principalement due aux ions Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}) et Bicarbonate (HCO_3^-) dans l'eau. Ces ions ou minéraux peuvent poser des problèmes d'entartrage dans les canalisations d'eau chaude, les appareillages d'eau potable et les systèmes de traitement d'eau. Les adoucisseurs offrent une solution de purification d'eau pour la dureté de l'eau et la suppression de calcaire. La dureté de l'eau s'exprime par le titre hydrotimétrique (en degré français TH, ou allemand). Celui-ci exprime la concentration en ion Ca^{2+} et Mg^{2+} . Les adoucisseurs d'eau sont des échangeurs d'ions spécifiques, conçus pour modifier la composition ionique de l'eau à traiter, et ainsi retirer les ions responsables d'une dureté élevée.

5.2. Origines des dépôts dans les eaux d'alimentation

Les dépôts sont essentiellement de trois provenances relativement bien connues :

- les matières en suspension dans l'eau sous forme d'insolubles (sables, argile, ...etc.) ;
- le développement des microorganismes (algues, champignons, ... etc.) ;

- la précipitation des sels minéraux contenus dans de l'eau surtout les sels de carbonate et les sulfates.

5.3. Caractéristiques de l'eau et pathologies

5.3.1. Caractéristiques de l'eau

L'eau brute contient :

- des minéraux dissous : cations, anions ;
- des gaz : O₂, N₂, CO₂;
- des matières en suspension (MES), qui pour le cas de l'eau de réseau eau de ville, sont en quantité normalement négligeable. On veillera tout de même à réaliser une filtration afin d'éviter de voir leur teneur en chaudière augmenter dans une trop forte proportion.

Les minéraux dissous auront pour conséquence :

- d'augmenter la viscosité de l'eau donc de diminuer les possibilités d'échange thermique et de déplacement des bulles de vapeur amenant le phénomène de primage,
- la création de dépôts au contact des parois chaudes.

Les gaz interviendront quant à eux :

- pour l'ensemble des gaz : de part leur pression partielle (action sur la température), de part le volume qu'ils peuvent occuper (diminution des coefficients d'échange thermique, blocage des processus).
- pour l'oxygène de part son pouvoir oxydant.

Le cas du dioxyde de carbone est particulier car il se trouve en présence importante en chaudière du fait de la dissociation des carbonates : il a pour conséquence une acidification des condensats.

5.3.2. Pathologies

L'eau de chaudière peut de plus, contenir des polluants provenant des retours de condensats. Dans ce cas un retraitement doit être envisagé pour permettre de les dépolluer.

Trois pathologies sont donc à craindre : primage, incrustations et corrosion...

5.3.2.1. Primage

On définit par le terme de « primage », tout ce qui correspond à un départ de vésicules liquides dans le circuit de vapeur, l'origine pouvant être, soit la formation de mousses, soit la formation de brouillard de gouttelettes entraînées sous forme d'eau liquide dans de la vapeur. Les sels contenus dans l'eau ainsi entraînée se cristallisent alors dans le circuit de vapeur. Ces phénomènes sont en étroite liaison avec les caractéristiques de l'eau (tension superficielle, viscosité) et les caractéristiques de la chaudière qui facilitent respectivement l'émulsion eau- vapeur, et l'entraînement des vésicules en suspension. La vaporisation de l'eau s'accompagne de l'entraînement de gouttes d'eau qui contiennent des sels minéraux dissous ou des matières en suspension. Les

vésicules d'eau polluent la vapeur et la rendent érodante vis à vis des parois qu'elles peuvent rencontrer. Les minéraux et les MES quant à eux, sont susceptibles de se déposer en aval lors d'une surchauffe de la vapeur ou d'être entraînés dans le flux de vapeur la rendant impropre à certaines utilisations (dans le cas du turbinage ces sels sont extrêmement dangereux car ils induisent un balourd du rotor pouvant aller jusqu'à sa rupture).

Le **primage** peut avoir pour **origine** :

- une mauvaise conception de la chaudière,
- un puisage trop important qui fait chuter la pression et amène une forte ébullition,
- une viscosité de l'eau trop élevée,
- la présence de MES,
- la présence de produits tensioactifs qui en abaissant la tension superficielle augmente le "moussage".

A titre d'exemple, en essayant de réchauffer la purée - ou la soupe de légumes - de la veille dans une casserole. Si le "feu" est trop poussé de grosses bulles de vapeur explosent en surface et entraînent de la matière...

5.3.2.2. Incrustations

Les dépôts peuvent provenir :

- de la précipitation de sels minéraux qui se trouveront en grande concentration, et à une température élevée qui entraîne une baisse de la solubilité des carbonates alcalino-terreux.
- des produits de la corrosion.

Les dépôts les plus dangereux pour la bonne marche de la chaudière seront les tartres adhérents aux surfaces d'échange :

- Ils diminuent les sections de passage pour les chaudières à lames ou tubes d'eau et amène une diminution de l'irrigation des surfaces d'échange.
- Ils augmentent la résistance thermique des surfaces d'échange et provoquent des surchauffes qui diminuent la résistance mécanique des aciers et peuvent provoquer des coups de feu.
- Ils sont générateurs de corrosion en devenant zones anodiques d'une corrosion par l'oxygène dissous.

Les boues non adhérentes se déposent en fond de chaudière pour les plus denses ou restent en suspension et peuvent être entraînées avec la vapeur et ainsi la polluer.

5.3.2.3. Corrosions

Les surfaces d'échange des chaudières côté fumées et côté eau subissent des corrosions. La corrosion a plusieurs origines que nous pouvons regrouper en deux catégories : l'une est caractérisée de principale et l'autre de secondaire. La corrosion principale est la corrosion imputable

à la qualité même de l'eau. Elle provient essentiellement de l'érosion mécanique et de l'érosion chimique ou tout simplement de la corrosion dite propre.

- Erosion mécanique

L'accélération du fluide au niveau des parois des faisceaux tubulaires favorise l'action érosive due au sable fin, aux oxydes métalliques en suspension dans l'eau ; ce qui montre la nécessité d'un dispositif de filtration de l'eau pour l'alimentation des chaudières.

- Erosion chimique ou corrosion chimique proprement dite

Il ne sera pas question de revenir sur ce qui a été déjà dit plus haut, mais on se doit toutefois de souligner que, les traitements appliqués précédemment à l'eau, en vue d'éviter les dépôts sur les surfaces d'échange, ne font en partie que favoriser la corrosion en raison de l'absence de couches protectrices de ces surfaces.

Comme corrosions secondaires, on y distingue :

- la corrosion bactérienne : Elle est due à la présence des bactéries anaérobies dans de l'eau ;
- la corrosion sous tartre : Elle est due à la présence des matières en suspension responsables de la formation des tartres. Cette corrosion qui naît par appauvrissement en oxygène de la pellicule d'eau à la surface des parois métalliques est dite corrosion par aération différentielle.
- la corrosion due à l'air humide : Elle survient suite au remplissage incomplet des tuyauteries ou d'un réservoir métallique.

Pour le côté eau les corrosions ont pour origine :

- la présence d'oxygène dissous. La corrosion par l'oxygène est accélérée par la présence de dépôts qui créent des zones anodiques,
- un pH trop faible qui autorise une corrosion acide,
- un pH trop élevé qui dissout la magnétite, oxyde naturellement protecteur de l'acier qui se forme à partir de 100°C,
- des piles bimétalliques du fait des hétérogénéités de température ou de nature de métal,
- une minéralisation trop élevée,
- La présence de dioxyde de carbone dans la vapeur peut amener une corrosion prématurée des réseaux par sa re-dissolution dans les condensats. En effet le pH des condensats chute rapidement avec des concentrations en dioxyde de carbone croissantes

* **Traitement des eaux des chaudières**

L'eau est le fluide caloporteur le plus répandu dans les installations de chauffage. Toutefois l'eau contient des composés chimiques dissous qui peuvent engendrer des dégradations des matériaux constituant la chaudière. Le traitement des eaux de chaudière a pour objectifs d'assurer un rendement maximum à l'installation tout en prolongeant sa durée de vie.

Le traitement approprié de l'eau d'alimentation de chaudière est donc une partie importante de l'opération et du maintien du système. Comme de la vapeur est produite, la concentration en solide dissous devient plus grande et forme des dépôts à l'intérieur de la chaudière. Ceci conduit à des faibles transferts de chaleur et réduit l'efficacité de la chaudière. Les gaz dissous tel que l'oxygène et le dioxyde de carbone réagiront avec les métaux dans les systèmes de chaudière et entraîneront une **corrosion**.

Quelles sont les qualités d'eau requises ?

- Absence de tartre : si l'eau est trop dure il y aura formation de tartre qui entraînera une réduction du transfert de chaleur et par conséquent de rendement
- Absence de corrosion : les gaz dissous, notamment l'oxygène, entraîneront la corrosion des surfaces métalliques de la chaudière
- pH convenable : une eau trop acide attaquera les parois de la chaudière tandis que si elle est trop alcaline il y aura formation de mousses. Le pH de l'eau d'alimentation doit être compris entre 8,5 et 10.

Afin de protéger la chaudière de ces contaminants, ils devraient être contrôlés ou éliminés, grâce à des traitements internes ou externes.

Il existe donc deux types de traitement :

- un traitement externe qui permet d'adoucir l'eau par l'intermédiaire de résines échangeuses d'ions
- un traitement de conditionnement (ou interne) qui permet d'éliminer les gaz dissous ainsi que les mousses en ajoutant des produits chimiques

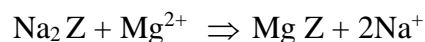
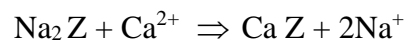
5.3.3. Traitement externe

Les équipements de traitement de l'eau purifient et désaèrent l'eau d'appoint ou l'eau d'alimentation. L'eau est parfois prétraitée par évaporation pour produire une vapeur relativement pure, qui est alors condensée et utilisée pour l'alimentation des chaudières. Les évaporateurs sont de différents types, le plus simple étant un réservoir par lequel les serpentins à vapeur sont passés pour chauffer l'eau jusqu'au point d'ébullition. Parfois pour augmenter le rendement la vapeur du premier réservoir passe par des bobines dans un second réservoir d'eau pour produire un chauffage additionnel et une évaporation. Les évaporateurs conviennent où la vapeur en tant que source de chaleur, est aisément disponible. Ils ont des avantages particuliers pour la déminéralisation, par exemple, lorsque les solides dissous de l'eau brute sont très élevés. Certains matériaux naturels ou synthétiques ont la capacité d'éliminer les ions minéraux de l'eau en les échangeant par d'autres. Par exemple, en passant l'eau à travers un simple adoucisseur échangeur de cations tous les ions calcium et magnésium sont éliminés et remplacés par des ions sodium. Puisqu'un simple échange de cation ne

réduit pas le total de solides de l'eau d'alimentation, il est parfois utilisé conjointement avec d'autres traitements de type décarbonatation. Un des traitements les plus courants et plus efficaces est le procédé par zéolite à chaux. Ceci comporte un prétraitement de l'eau avec de la chaux pour réduire la dureté, l'alcalinité et dans certains cas la silice, et le traitement subséquent avec un adoucisseur à échange de cation. Ce système de traitement accomplit plusieurs fonctions: adoucissement, réduction de l'alcalinité et de la silice, réduction d'oxygène, et l'élimination de matière suspendue et de la turbidité.

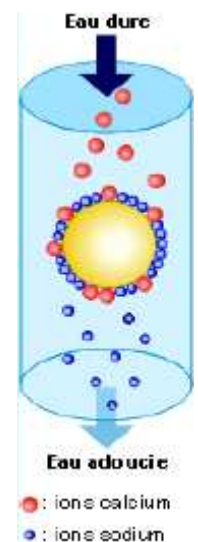
Le traitement chimique à l'intérieur de la chaudière est généralement essentiel et complète le traitement externe en faisant attention à ce qu'aucune impureté n'entre dans la chaudière avec l'eau d'alimentation (dureté, oxygène, silice, etc.). Dans de nombreux cas, le traitement externe de l'eau d'approvisionnement n'est pas nécessaire et l'eau peut être traitée seulement par des méthodes internes.

L'adoucissement sur résine échangeuse d'ions est un moyen pour lutter contre l'entartrage généré par la présence des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} dans l'eau. La résine est une zéolithe de sodium noté Z.



On évite ainsi la formation de **tartre** (CaCO_3 et MgCO_3). Ce procédé laisse s'écouler une eau riche en sels de sodium qui ne sont pas susceptibles de former de tartre.

Figure 21 : Technique d'adoucissement sur résines



5.3.4. Traitement interne

Le traitement interne peut constituer l'unique traitement lorsque les chaudières opèrent à pression faible ou modérée, lorsqu'une large quantité de vapeur condensée est utilisée pour l'eau d'alimentation, ou lorsque la qualité de l'eau brute est bonne. Le but d'un traitement interne est de

- 1) réagir avec la dureté de l'eau d'alimentation et l'empêcher de précipiter avec le métal de la chaudière (tartre);
- 2) conditionner n'importe quelles matières en suspension telles les boues de dureté ou l'oxyde de fer dans les chaudières et de les rendre non-adhérentes au métal de chaudière;
- 3) assurer une protection anti-moussage pour permettre une concentration raisonnable en solides dissous et en suspension dans la chaudière sans risque de primage;
- 4) éliminer l'oxygène de l'eau et d'assurer une alcalinité suffisante pour empêcher la corrosion dans la chaudière.

De plus, en tant que mesure supplémentaire, un traitement interne devrait empêcher la corrosion et l'entartrage dans les systèmes d'alimentation d'eau et protéger les systèmes de condensat de vapeur contre la corrosion. Pendant le procédé de traitement, qui est un complément essentiel au programme de traitement à l'eau, des doses spécifiques de produits de traitement sont ajoutés à l'eau. Les produits couramment utilisés incluent:

- **Dispersants phosphates, dispersants polyphosphates (produits chimiques d'adoucissement):** réagissant avec l'alcalinité de l'eau de chaudière, ces produits neutralisent la dureté de l'eau des chaudières en formant le phosphate tricalcique, et les composants insolubles qui peuvent être disposés et purgés de façon continue ou périodique par le bas de la chaudière.
- **Dispersants naturels et synthétiques (Agents antitartre):** augmentent les propriétés dispersives des produits de traitements. Ils peuvent être:
 - Des polymères naturels: lignosulfonates de calcium, tanins
 - Des polymères synthétiques: polyacrylates, copolymère acrylique maléique, copolymère styrène maléique, polystyrène sulfonates etc.
- **Séquestrant:** tels que les phosphates inorganiques qui agissent comme des inhibiteurs.
- **Réducteur d'oxygène:** sulfite de sodium, tanins, tannis, hydrazine, dérivés d'hydroquinone, dérivés d'hydroxylamine, dérivés d'acide ascorbique, etc. Ces réducteurs, catalysés ou non, réduit les oxydes et l'oxygène dissous. Passive aussi les surfaces des métaux. Le choix du produit et la dose requise dépendra de la manière dont le dégazeur thermique est utilisé.
- **Agents anti-moussage et anti-primage:** mélange d'agents tensioactifs qui modifient la tension de surface d'un liquide, élimine le moussage et empêche le primage des particules fines de l'eau dans la vapeur.

Les produits chimiques d'adoucissement utilisés incluent les cendres de soude, les caustiques et divers types de phosphates de sodium. Ces produits chimiques réagissent avec les composés de calcium et de magnésium dans l'eau d'alimentation. Le silicate de sodium est utilisé pour réagir sélectivement avec la dureté en magnésium. Le bicarbonate de calcium entrant avec l'eau d'alimentation est décomposé avec la température de la chaudière ou réagit avec les cendres caustiques pour former le carbonate de calcium. Puisque le carbonate de calcium est relativement insoluble, il tend à sortir de la solution. Le carbonate de sodium est partiellement décomposé à température élevée en hydroxyde de sodium (caustique) et en dioxyde de carbone. Les températures élevées de l'eau de chaudière réduisent la solubilité du sulfate de calcium et tend à le faire précipiter directement sur le métal de la chaudière en tant que tartre. En conséquence, le sulfate de calcium doit être traité chimiquement pour former un précipité dans l'eau où il sera conditionné et éliminé

par vidange. Le sulfate de calcium réagit avec le carbonate de sodium, le phosphate de sodium ou le silicate de sodium pour former du carbonate, phosphate ou silicate de calcium insoluble. Le sulfate de magnésium réagit avec la soude caustique pour former un précipité d'hydroxyde de magnésium. Certains magnésiums peuvent réagir avec la silice pour former le silicate de magnésium. Le sulfate de sodium est très soluble et reste en solution à moins que l'eau soit évaporée presque à sec. Il y a deux approches générales pour le traitement des boues à l'intérieur d'une chaudière: par coagulation ou par dispersion. Lorsque la quantité totale de boue est élevée (comme résultat de dureté élevée d'eau d'alimentation), il est préférable de coaguler les boues pour former des particules flocculeuses. Celles-ci peuvent être éliminées par vidange. La coagulation peut être obtenue par l'ajustement soigneux des quantités d'alcalis, de phosphates et de composés organiques utilisés pour le traitement. Quand la quantité de boue n'est pas trop élevée (faible dureté de l'eau d'alimentation) il est préférable d'utiliser un haut pourcentage de phosphates dans le traitement. Les phosphates forment des particules séparées de boue. Un haut pourcentage en dispersants de boue organique est utilisé dans le traitement pour garder les particules de boue dispersées dans toute l'eau de chaudière. Les matières employées pour conditionner les boues incluent divers matériaux organiques de tanins, de lignine ou d'alginate. Il est important que ces produits organiques soient décelés et traités, ainsi, ils sont à la fois efficaces et stable à la pression de travail des chaudières. Certains matériaux organiques synthétiques sont utilisés en tant qu'agents anti-moussage. Les produits chimiques utilisés pour réduire l'oxygène incluent le sulfite de sodium et l'hydrazine. Diverses combinaisons de polyphosphates et de produits organiques sont utilisées pour empêcher le dépôt de tartre et la corrosion dans les systèmes d'alimentation d'eau. Les méthodes courantes internes d'alimentation en produit chimiques incluent l'utilisation proportionnée de réservoirs de solutions chimiques et de pompes. En général, les produits chimiques de décarbonatation (phosphates, les cendres de soude, les caustiques, etc.) sont ajoutés directement à l'eau d'alimentation à un point près de l'entrée de la chaudière. Ils peuvent être aussi ajoutés par une voie dérivée les déchargeant dans la chaudière. Les produits chimiques devraient être déchargés dans la section d'eau d'alimentation de la chaudière afin que les réactions se produisent dans l'eau avant d'arriver dans le secteur de génération de vapeur. Les produits chimiques de décarbonatation peuvent être ajoutés continuellement ou par intermittence suivant, entre autre, la dureté de l'eau d'alimentation. Les produits chimiques ajoutés pour réagir avec l'oxygène dissous (sulfate, hydrazine, etc.) et les produits chimiques utilisés pour empêcher l'entartrage et la corrosion devrait alimenter le système d'alimentation le plus continuellement possible. Les produits chimiques utilisés pour empêcher la corrosion des systèmes de condensat peuvent être ajoutés directement à la vapeur ou dans le système d'alimentation d'eau, en fonction des produits utilisés. Une alimentation continue est préférable mais, dans certains cas, des applications par intermittence suffiront.

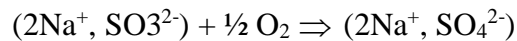
Corrosion caustique:

On utilise du phosphate disodique pour tamponner le pH selon la réaction :



Attaque de l'oxygène

On utilise le sulfite de sodium pour éliminer l'oxygène



Corrosion acide

Dissolution de la magnétite, protecteur naturel de l'acier selon



Attaque du dioxyde de carbone



Le dioxyde de carbone acidifie et favorise la corrosion acide.

5.3.5. Adoucissements sur résines

Il s'agit du traitement minimal qui élimine, par passage sur des résines, le calcium et le magnésium dont les sels produiraient l'entartrage des circuits et des équipements. Ces équipements se présentent sous forme de bouteilles contenant la résine et sont régénérés périodiquement à l'aide d'une solution chargée en chlorure de sodium. Ce type de traitement n'est pas toujours suffisant pour les applications industrielles. En effet, les gaz dissous, les carbonates, la silice et les autres ions passent au travers de ces résines et seront autant de sources de corrosion, d'encrassement, de moussage ou d'entraînement dans la vapeur. Dans ce cas, des traitements complémentaires (décarbonatation, déminéralisation) sont nécessaires.

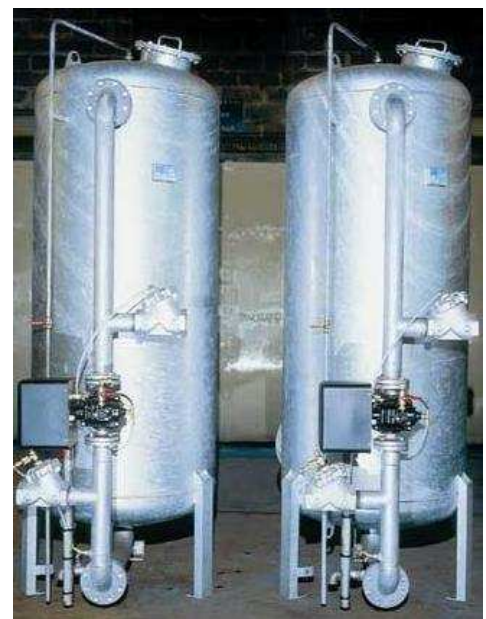


Figure 22. Adoucisseurs

5.3.6. Décarbonatation sur résine

La **décarbonatation** sur résine permet de réduire l'alcalinité (TAC) de l'eau brute. BABCOCK WANSON a mis au point un procédé breveté afin de rationaliser et limiter la taille des installations : le Carbomix ®, une installation compacte dans laquelle les phases de décarbonatation et adoucissement sont réalisées dans un seul échangeur. L'échangeur Carbomix ® contient deux types de résines qui, compte tenu de leur différence de densité, se positionnent dans l'appareil en lits superposés. Arrivés à saturation, les échangeurs Carbomix ® sont régénérés par passages successifs

d'une solution d'acide chlorhydrique et de saumure (chlorure de sodium). La régénération des échangeurs est automatique.

Lorsque les conditions d'utilisation nécessitent une très faible teneur en sels dissous, il convient de déminéraliser l'eau, soit par passage sur résine échangeuse d'ions, soit sur membranes selon le principe de l'osmose inverse.

5.3.7. Déminéralisation sur résine : le procédé HRW®

En se basant sur le procédé de régénération à contre-courant, BABCOCK WANSON a mis au point le procédé « HRW » qui permet selon les besoins, d'éliminer tous les sels (et la silice) par mise en place de résines cationiques et anioniques (chaîne primaire) et/ou de lits mélangés (chaîne de finition).

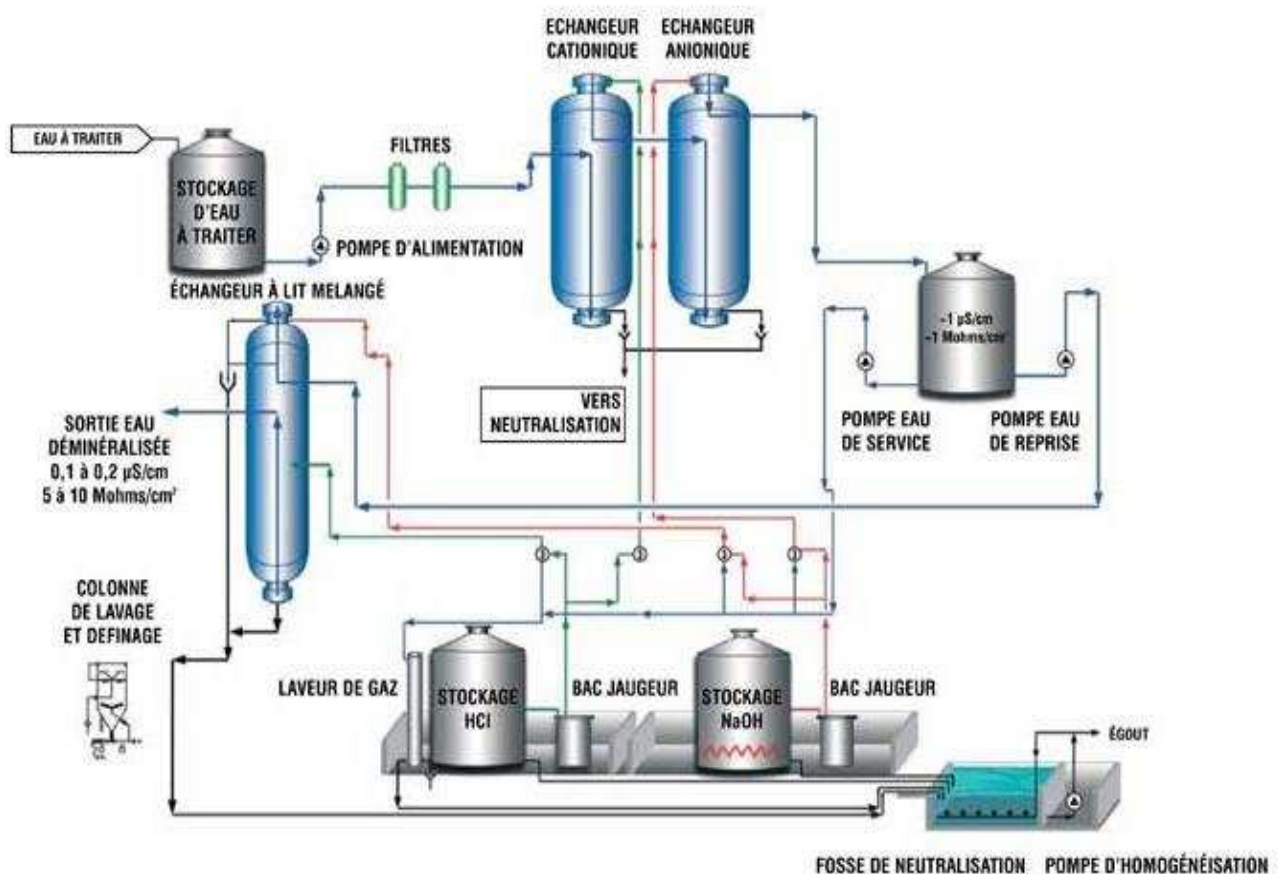


Figure 23. Schéma de principe d'une installation

Le procédé dit en suspension et associé à la régénération à contre-courant présente de nombreux avantages en termes de consommation de réactifs régénérants et de qualité d'eau produite:

- qualité de l'eau produite de faible conductivité et stable dans le temps ;
- pas de phase de détassage ;
- obtention d'une eau de qualité constante sur la durée du cycle ;
- diminution notable du volume d'eau de service et donc du volume d'effluents au rejet ;

- réduction de la durée de régénération et de la quantité de réactifs (30 à 40%) ;
- réduction de la taille des installations.

5.3.8. Déminéralisation par osmose inverse

Cette technique membranaire permet de réduire la minéralisation de l'eau. Elle présente l'avantage de ne pas utiliser de régénérant (acide et base). BABCOCK WANSON a développé toute une gamme d'osmoseurs qui permet de répondre de manière optimisée aux besoins des industriels.

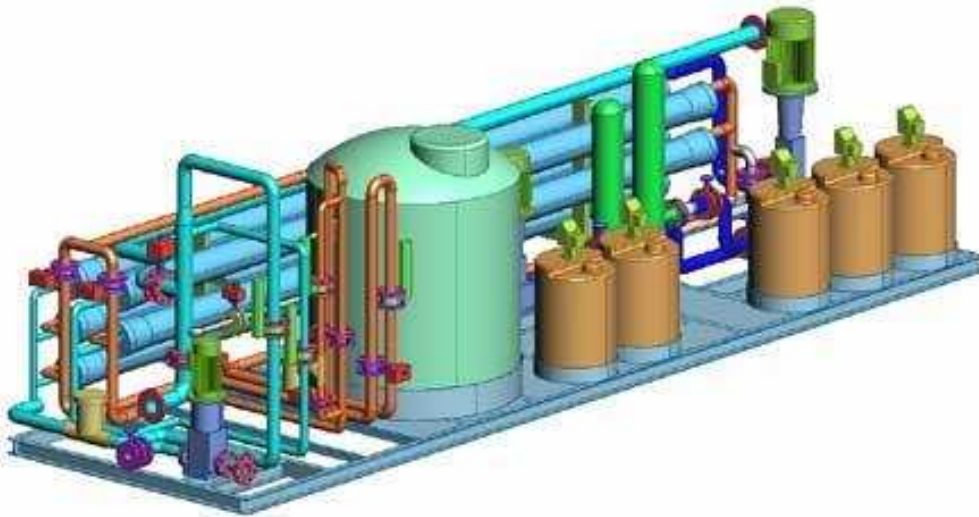


Figure 24. Vue en 3D d'un skid d'osmose inverse

5.3.9. Dégazage thermique (Dégazeurs BABCOCK WANSON)

L'oxygène et le gaz carbonique présents dans l'eau sont des agents de corrosion très actifs vis-à-vis de l'acier. Il est indispensable de procéder à leur élimination.

Le dégazage peut s'effectuer soit chimiquement (pour l'oxygène), soit par voie physique (pour l'ensemble des gaz dissous).

5.4. Lutte contre la corrosion

La lutte contre la corrosion consiste essentiellement à agir à trois niveaux :

5.4.1. Par la connaissance des caractéristiques chimiques de l'eau

On agira au niveau des agents chimiques responsables de l'oxydation tels que le CO_2 et l' O_2 ; cela requiert l'utilisation des inhibiteurs à action chimique tels que le phosphate trisodique, les polyphosphates qui, en plus de leur pouvoir tartrifuge, provoquent la phosphatation superficielle, tout en élevant le pH de l'eau. Ce qui neutralise le gaz carbonique agressif. L'emploi des réducteurs chimiques tels que le sulfite de sodium (Na_2SO_3) et l'hydrazine (N_2H_4) permettent de détruire les dernières traces de l'oxygène dissous qui restent après le dégazage thermique.

5.4.2. Par la connaissance des phénomènes de corrosion

On agira au niveau du mécanisme de corrosion i. e. pour empêcher la réaction électrochimique elle-même en utilisant des agents inhibiteurs électrochimiques (sels de zinc, phosphates, chromates). Cette lutte consiste à placer l'eau du côté agressif de son équilibre chimique (pH= 6,5 à 7). Ainsi, il ne peut plus se former des tartres protecteurs.

5.4.3. Par une action préventive

Il s'agit d'une forme de lutte qui s'opère au niveau de l'appareillage par l'utilisation des inhibiteurs filmogènes (les amines grasses). Une telle forme de lutte est difficile à pratiquer dans les chaudières en raison des composés alcalins et silicates auxquels elle fait appel. On utilise plutôt, pour la protection des réseaux de condensats, des inhibiteurs volatiles qui, comme le CO₂ (CO₂ gaz non corrosif), sont entraînés dans la vapeur et se rassemblent dans les condensats. Ce sont des amines volatiles tels que :

- le cyclohexalamine, la morphaline tous deux des amines neutralisantes :
- les amines filtrantes (stéarylamine, octadécylamine) qui constituent un film continu et imperméable supprimant le contact direct eau -métal, et donc toute cause de corrosion.

5.5. Lutte contre le primage

La protection contre le primage consiste à additionner à l'eau d'alimentation des chaudières basse et moyenne pressions notamment (jusqu'à 45 bars) des produits anti-primage qui ont la propriété de provoquer la coalescence des bulles de vapeurs dans le liquide ou des gouttelettes d'eau dans la vapeur facilitant la rupture des bulles en surface d'eau ou des gouttelettes avant leur départ dans la vapeur. Les produits anti-primage les plus utilisés sont :

- les polyamides à longues chaînes ;
- les polyéthylènes et polypropylènes glycols.

Dans le tableau suivant, vous pouvez trouver une liste de contaminants de l'eau d'alimentation des chaudières, leurs effets et les traitements possibles.

Tableau : Types d'impuretés ou contaminants de l'eau: leurs effets et les traitements préconisés.

IMPURETE	RESULTAT	S'ELIMINE PAR	COMMENTAIRES
<i>Gaz Soluble</i>			
Acide Sulfhydrique (H ₂ S)	Odeurs de l'eau nauséabonde: mauvais goût, et corrosif pour la plupart des métaux.	Aération, Filtration, et Chloration.	Se trouve principalement dans les eaux souterraines et les cours d'eau pollués.
Dioxyde de Carbone	Corrosif, forme l'acide	Désaération,	Les amines neutralisantes sont

(CO ₂)	carbonique en condensat.	neutralisation par alcalinisation.	utilisées pour empêcher la corrosion dans les circuits de condensat.
Oxygène (O ₂)	Corrosion (notamment par piqûre) des tubes de la chaudière.	Désaération & traitement chimique (Sulfite de Sodium ou Hydrazine)	Piquage de la tuyauterie, rupture dans les circuits de vapeur, etc.
<i>Solides en Suspension</i>			
Sédiment & Turbidité	Boue et primage calcaire.	Décantation et filtration.	Tolérance approximative de 5ppm max. pour la plupart des applications, 10ppm pour l'eau potable
Matière Organique	Primage, moussage, les dépôts peuvent colmater les canalisations et causer la corrosion.	Décantation; filtration, et traitement chimique	Se trouve principalement dans l'eau de surface, causé par, notamment, la décomposition de la végétation. Les matières organiques se décomposent pour former des acides organiques. Le résultat est un pH d'eau d'alimentation faible, qui provoque l'attaque des conduites des chaudières. Il inclut les diatomes, les moisissures, les films biologiques, les bactéries manganiques/ferrique. Les particules suspendues se rassemblent à la surface de l'eau de la chaudière et rendent difficile la libération des bulles de vapeur remontant à la surface. Le moussage peut aussi être attribué à l'eau contenant des carbonates en solution dans laquelle un léger précipité flocculeux sera formé à la surface de l'eau.
<i>Solides Colloïdaux Dissous</i>			

Huile & Graisse	Moussage, dépôts dans la chaudière	Coagulation & filtration	Entre dans la chaudière avec le condensat
Dureté, Calcium (Ca), et Magnésium (Mg)	Dépôts calcaire dans la chaudière, empêche le transfert thermique, et l'efficacité thermique. Dans les cas graves peut mener à la brulure ou à la rupture des tuyaux de la chaudière.	Adoucissement, plus traitement interne dans la chaudière.	Les formes sont, dans l'ordre, des bicarbonates, des sulfates, des chlorures et des nitrates. Certains sels de calcium sont réversiblement solubles. Le magnésium réagit avec les carbonates pour former des composés à faible solubilité.
Sodium, alcalinité, NaOH, NaHCO ₃ , Na ₂ CO ₃	Moussage, carbonates forment l'acide carbonate dans la vapeur, causent notamment la corrosion du séparateur d'eau de condensation, peuvent causer une fragilisation.	Désaération de l'eau d'appoint et de condensat de retour. Echangeur d'ion; Désionisation, traitement acide de l'eau d'appoint.	Les sels de sodium sont trouvés dans la plupart des eaux. Ils sont très solubles, et ne peuvent être éliminés par précipitation chimique.
Sulfates (SO ₄)	Entartrage important s'il y a présence de calcium	Désionisation	Les limites de tolérance sont environ 100-300ppm CaCO ₃
Chlorure, (Cl)	Primage, i.e. entraînement par la vapeur d'eau et de sels dissous, peut provoquer des dépôts de sels dans les surchauffeurs et les turbines. Moussage si présent en grande quantité.	Désionisation	Le primage est causé par la concentration en carbonate de sodium, sulfate de sodium ou chlorure de sodium en solution. Le sulfate de sodium est trouvé dans beaucoup d'eaux aux USA, et dans les eaux où le calcium ou le magnésium est précipité avec le carbonate de sodium.
Fer (Fe) et Manganèse (Mn)	Dépôts dans la chaudière, en grande quantité peut inhiber le transfert de chaleur.	Aération, filtration, ion exchange.	La forme la plus courante est le bicarbonate de fer.

Silice (Si)	Entartrage important dans les chaudières et les systèmes de refroidissement.	Désionisation; procédé chaux-soude, traitement par zéolite.	La silice se combine avec de nombreux éléments pour former la silicate. Les silicates forment des dépôts très tenaces dans la chaudière. Très difficile à enlever, souvent seulement par acide fluorhydrique.
-------------	--	---	---

Source: http://energyconcepts.tripod.com/energyconcepts/water_treatment.htm

Le traitement des eaux de chaudière est donc une étape indispensable pour assurer le bon fonctionnement et garantir la pérennité de l'installation. Il est nécessaire de déterminer la qualité de l'eau brute ainsi que de connaître la qualité d'eau d'alimentation requise pour la chaudière afin de définir le type de traitement à effectuer.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude a montré combien de fois les chaudières sont nécessaires dans l'industrie. La vapeur d'eau, en raison des avantages qu'elle procure, est beaucoup utilisée pour le transport de chaleur. Les combustibles utilisés dans ces chaudières sont de nature organique, c'est-à-dire qu'ils sont composés de carbone. Ils contiennent des composants combustibles (carbone, hydrogène, soufre) et d'autres composants (oxygène, azote, soufre, etc.).

La nature du combustible utilisé dans une chaudière conditionne la construction de cette chaudière. Elle influe aussi sur le mode d'exploitation.

Un kilogramme de vapeur d'eau permet de transporter environ 500kcal. La vapeur saturée couvre le domaine des températures comprises entre 100°C et 260°C, la vapeur surchauffée 150°C à 550°C.

Le traitement approprié de l'eau d'alimentation de chaudière est une partie importante de l'opération et du maintien du système.

Le traitement et le conditionnement de l'eau d'alimentation de chaudière doit satisfaire trois objectifs principaux:

- L'échange continu de chaleur
- La protection à la corrosion
- La production de haute qualité de vapeur

Le traitement externe est la réduction ou l'élimination des impuretés de l'eau hors de la chaudière. En général, le traitement externe est utilisé quand la quantité de telles ou telles impuretés de l'eau d'alimentation est trop élevée pour être tolérée par le système de chaudière en question. Il y a

différents types de traitement externe (adoucissement, évaporation, désaération, contracteurs à membranes etc. ...) qui peuvent être utilisés pour l'eau d'approvisionnement.

Le traitement interne est le traitement des impuretés à l'intérieur du système de chaudière. Les réactions se produisent dans les lignes d'alimentation ou dans la chaudière. Le traitement interne peut être utilisé seul ou avec un traitement externe. Son but est de réagir correctement avec la dureté de l'eau d'alimentation, d'éliminer les boues, de réduire l'oxygène et d'empêcher le moussage de l'eau des chaudières.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dizier M. (1984): Les chaudières. Tome B₁, Techniques de l'ingénieur.
- [2] Bailly, K. (1971): Thermodynamique Technique : Tome 2b- Machines thermiques et frigorifiques. Editions Bordas.
- [3] Notes de cours du professeur chercheur Dr. Emile A. SANYA: Exploitation de l'énergie thermique I, 2002- 2003 ; EPAC ex CPU.