

5 INSTALLATIONS À VAPEUR (GÉNÉRALITÉS)

5.1 INTRODUCTION

La vapeur d'eau est un fluide qui présente de nombreux avantages, ce qui explique qu'elle soit autant utilisée :

- tout d'abord, il s'agit d'un produit naturel, bon marché, disponible à peu près partout, non polluant, et ne présentant aucun risque d'incendie ;
- ses caractéristiques thermodynamiques sont très intéressantes, notamment sa très forte chaleur latente de vaporisation. Les niveaux de température et de pression auxquels on peut l'utiliser ne posent pas de problème technologique particulier, dès lors que certaines précautions sont prises ;
- ses usages sont multiples, avec en particulier la possibilité de produire de la force motrice par détente, et bien sûr de transférer de chaleur sous forme monophasique (liquide ou vapeur) aussi bien que diphasique ;
- enfin, elle peut être produite dans des chaudières en brûlant de nombreux combustibles, et notamment du fioul lourd, du charbon, des ordures ménagères...

Ce chapitre traite des réseaux de vapeur et de l'optimisation thermodynamique de leur conception. Sur le plan technologique, seuls seront abordés les aspects qui ont une incidence sur les bilans énergétiques des installations. C'est pourquoi, et malgré leur importance fondamentale en pratique, on ne discutera pas des questions de sécurité liées à la pression, ni de celles qui concernent les dilatations différentielles des équipements, ni du tracé des canalisations.

5.2 ENTHALPIE ET EXERGIE DE LA VAPEUR

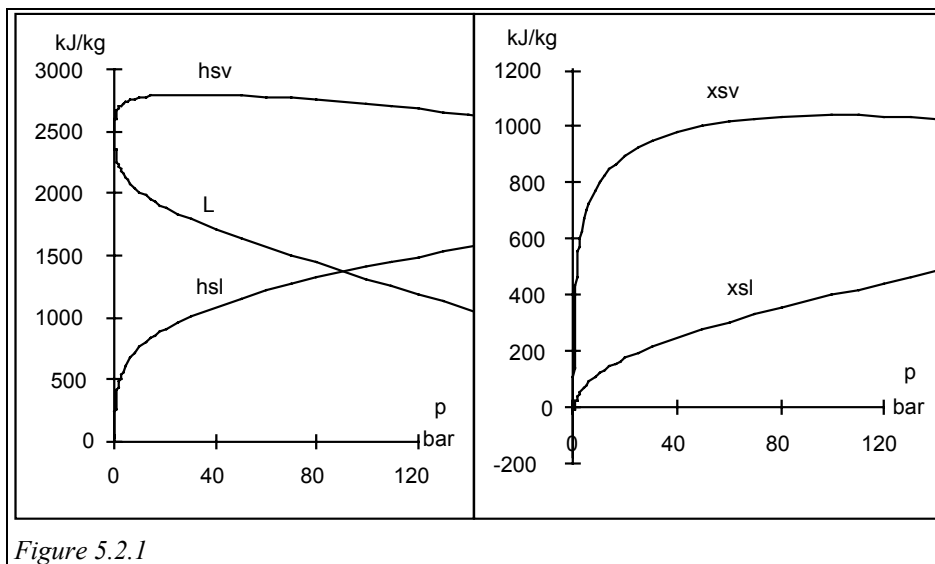


Figure 5.2.1

Comme le montrent les graphiques de la figure 5.2.1, l'enthalpie spécifique de la vapeur saturée h_{sv} reste à peu près constante entre 10 et 70 bars, la baisse de la chaleur latente de vaporisation L étant compensée par la croissance de l'enthalpie d'ébullition commençante h_{sl} . De la même manière, l'exergie de la vapeur saturante (calculée pour $T_0 = 300$ K) croît très rapidement jusque vers 40 bars, pour rester ensuite relativement stable.

Le graphique de la figure 5.2.2 montre que, à température de surchauffe T donnée, l'exergie de la vapeur croît fortement de 0 à 50 bars, puis varie relativement peu avec la pression. Pour $T = 700$ K (427 °C), elle passe par un maximum pour $P = 100$ bars.

Le diagramme exergetique de la figure 1.2.3, établi pour $T_0 = 288,15$ K, confirme ces conclusions et fournit directement l'exergie disponible dans une gamme de pressions et températures plus large.

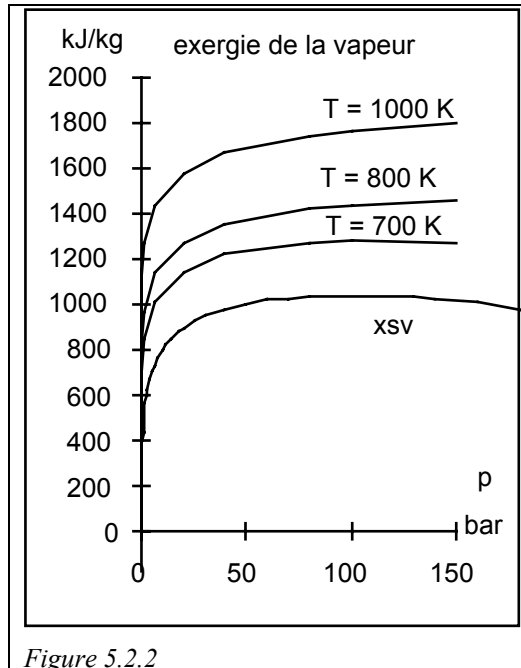


Figure 5.2.2

D'une manière générale, étant donné que l'augmentation de la pression induit des contraintes mécaniques de plus en plus coûteuses, il existe le plus souvent un optimum économique à des niveaux de pression compris entre 30 et 80 bars, sauf pour des installations particulières telles que les centrales à vapeur de très forte puissance.

5.3 CONFIGURATION GÉNÉRALE DES INSTALLATIONS À VAPEUR

Le schéma de la figure 5.3.1 montre les différents éléments constitutifs d'un réseau de vapeur :

- l'alimentation en eau : l'eau brute arrive en 1, en bas à droite. Cette eau doit être traitée pour éviter l'encrassement et la corrosion du réseau. En 2, l'eau traitée est introduite dans la bache alimentaire, où elle se mélange aux condensats qui reviennent sur le réseau de retour, après utilisation par les différents procédés ou équipements de chauffage ou de production de force motrice ;
- le dégazage de l'eau : la bache alimentaire représentée ci-dessus joue par ailleurs un rôle fondamental : dégazer l'eau. Le dégazage permet d'éliminer les différents gaz dissous dans l'eau, et en particulier le gaz carbonique et l'oxygène très corrosif dans la chaudière et les canalisations de retour. Outre cet aspect, la présence d'air ou d'incondensables a pour effet de limiter les coefficients d'échange par formation d'un film d'air qui s'oppose au transfert thermique, et de réduire la température de condensation ;
- le générateur de vapeur : en sortie de dégazeur en 3, l'eau est mise sous pression

par une pompe alimentaire, puis dirigée vers le générateur de vapeur, où elle est chauffée à l'état liquide dans l'économiseur, vaporisée dans le vaporiseur, puis surchauffée. Des séparateurs assurent le séchage de la vapeur pour éviter que de l'eau liquide soit emportée dans le réseau vapeur. On appelle primage ce phénomène d'entraînement qui peut parfois se produire malgré les précautions prises. Les causes peuvent être soit un mauvais traitement de l'eau, qui conduit à une concentration en sels trop élevée, soit un appel brutal de vapeur, soit une erreur de conception de la chaudière. Bien que les termes de chaudière et de générateur de vapeur puissent être considérés comme synonymes, nous réserverons le second pour désigner des appareils fonctionnant sans combustion ;

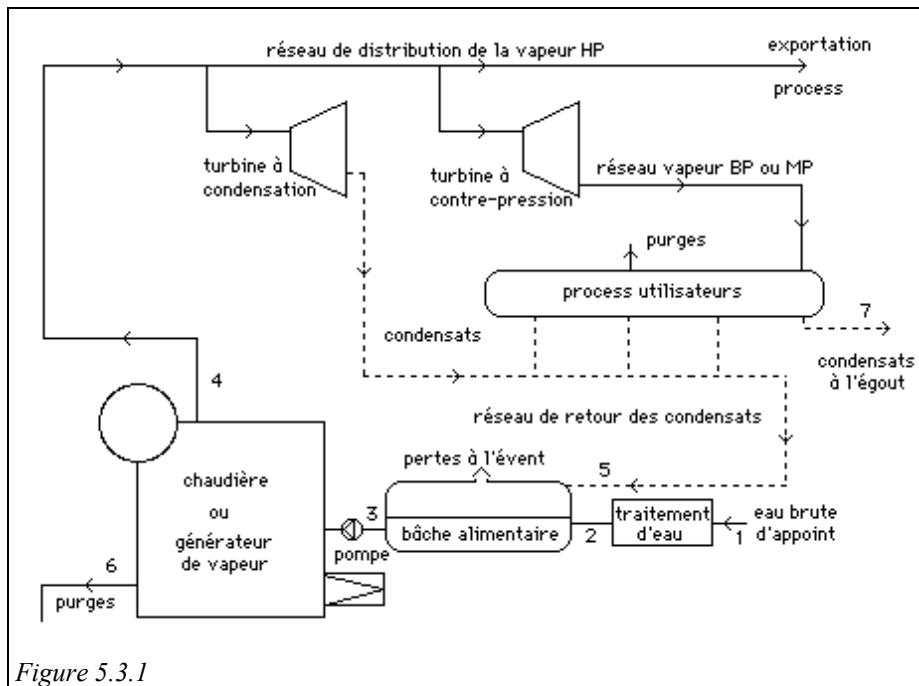


Figure 5.3.1

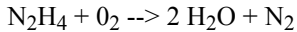
- les purges de déconcentration : sans elles, les sels dissous dans l'eau ne se vaporisant pas, leur concentration augmenterait dans la chaudière au-delà des valeurs acceptables (corrosion) du fait de l'introduction d'eau d'appoint en 1 ;
- les postes d'utilisation de la vapeur : la vapeur surchauffée sort en 4 de la chaudière et est acheminée vers les différents postes d'utilisation. Comme indiqué, il est fréquent que le réseau de vapeur se compose de plusieurs sous-réseaux, à haute pression (> 40 bars), moyenne pression (\approx 20 bars) et basse pression (4 bars), en fonction des besoins des utilisateurs. Une partie de la vapeur peut aussi être exportée vers une autre partie de l'usine ou des clients extérieurs. On a représenté sur le schéma une turbine, et différents procédés ;
- le retour des condensats : après usage, la vapeur est détendue, généralement à la pression atmosphérique, et les condensats sont redirigés vers la bâche alimentaire (5), si leur qualité le permet, sinon évacués vers l'égoût (7). De surcroît, des purges sont pratiquées pour des raisons diverses au niveau des postes d'utilisation. Toutes ces pertes expliquent la nécessité d'apporter un appoint d'eau.

5.4 DÉGAZAGE DE L'EAU

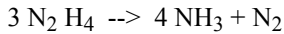
Le dégazage peut être assuré par voie chimique ou thermique.

5.4.1 DÉGAZAGE CHIMIQUE

Le réactif utilisé pour extraire l'oxygène est l'hydrazine (N_2H_4) :



L'excédent d'hydrazine se décompose quant à lui dans la chaudière en azote et en ammoniac :



L'ammoniac emporté par la vapeur contribue à relever le pH des condensats, et se combine avec le gaz carbonique pour produire du bicarbonate d'ammoniac. En cas de dégazage chimique, il faut proscrire l'utilisation du cuivre dans le réseau de retour des condensats.

L'utilisation du dégazage chimique est limitée aux installations de petite taille, ou encore comme complément à un dégazage thermique.

5.4.2 DÉGAZAGE THERMIQUE

D'après la loi de Henry, la solubilité d'un gaz est proportionnelle à sa pression partielle dans la phase gazeuse, le coefficient de proportionnalité ϕ étant fonction de la température. Dans le cas de l'oxygène, ϕ passe par un minimum autour de 100 °C, et varie peu entre 75 et 125 °C.

Le dégazage est assuré en portant à ébullition l'eau alimentaire, ce qui permet de diminuer la pression partielle de O_2 et CO_2 (figure 5.4.1). Les gaz libérés sont alors rejetés dans l'atmosphère, soit par décharge à travers un évent si la pression du dégazeur est supérieure à la pression atmosphérique, soit par extraction par une pompe à vide si elle est inférieure.

Le principal inconvénient du dégazage à dépression est qu'en cas de fuite, il y a entrée d'air, ce qui est exactement contraire au but recherché. C'est pourquoi les dégazeurs opèrent généralement en légère surpression, à des températures voisines de 110 à 120 °C, et pouvant aller jusqu'à 150 °C. La température de retour des condensats étant comprise entre 50 et 80 °C, il est alors nécessaire d'apporter un complément de chaleur à la bêche alimentaire. En sortie de dégazeur, la teneur en oxygène de l'eau alimentaire est comprise entre 0,007 et 0,02 mg/l.

5.5 PURGES DE DÉCONCENTRATION

Afin de maintenir la concentration en chaudière des sels dans les limites recommandées par les constructeurs, il est nécessaire de pratiquer des purges,

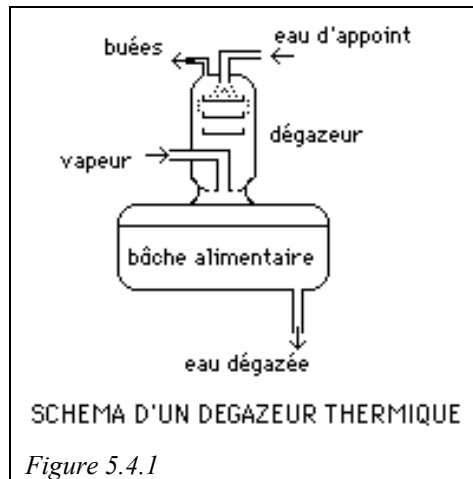


Figure 5.4.1

continues ou intermittentes, qui sont fonction d'une part de la qualité de l'eau d'appoint, et d'autre part de la proportion de retour des condensats. On les appelle purges de déconcentration.

Elles sont caractérisées par le taux de purge D/V, rapport des purges de déconcentration à la vapeur produite. Un bilan massique sur les sels entrant dans et sortant de la chaudière ($D S_c - V S_b = 0$ à l'équilibre) montre aisément que D/V est donné par la formule :

$$D/V = \frac{S_b}{S_c}$$

S_c étant la concentration limite en chaudière, et S_b la concentration moyenne dans la bache alimentaire.

Selon les cas, S_c et S_b sont exprimées en mg/l ou en °f (degré français).

On calcule successivement, pour les différentes catégories de sels, les valeurs de D/V à respecter, et on retient la plus élevée.

Sans entrer dans le détail du traitement de l'eau, il importe de savoir que les principaux sels existants sont les suivants :

- les sels incrustants (calcium, magnésium) caractérisés par le titre hydrotimétrique TH, qui mesure la "dureté" de l'eau (en °f) ;
- les sels alcalins (potasse, soude), caractérisés par le titre alcalimétrique simple TA, et le titre alcalimétrique complet TAC (°f), la différence entre les deux valeurs étant liée à la présence de bicarbonates ;
- les chlorures, silicates, phosphates et sulfites, qui se mesurent en mg/l. La mesure des chlorures est souvent effectuée, car elle donne une indication de la teneur totale en sels, qui lui est à peu près proportionnelle, pour une installation donnée.

TABLEAU 5.1

pression de vapeur (bars)	< 15	25 à 35	45 à 55
eau alimentaire			
pH (à froid)	8,5	8,5	8,5
TH maxi (°f)	0,3	0,15	0,05
oxygène maxi (mg/l)	0,1	0,03	0,01
eau de chaudière			
pH mini mesuré à 25 °C	11,5	11,2	10,5
TAC maxi (°f)	120	50	20
TAC mini (°f)	25	15	5
Salinité totale (mg/l)	2 500	1 500	1 000
Phosphates (mg/l de PO ₄)	> 30	> 30	> 30
Silice maxi (mg/l de SiO ₂)	150	40	15
$\frac{SiO_2}{TAC}$ maxi	1,5	1	1

Comme le montre le tableau 5.1, les caractéristiques des eaux recommandées par les constructeurs sont d'autant plus sévères que la pression de service est élevée.

Le taux de purge D/V peut parfois atteindre des valeurs importantes, notamment dans les chaudières à haute pression, où les concentrations limites Sc sont faibles. Il peut en résulter une perte énergétique non négligeable si l'enthalpie résiduelle des purges n'est pas récupérée, par exemple pour fournir l'énergie nécessaire au bon fonctionnement du dégazeur. Pour cela, il est possible de détendre les purges dans un ballon et d'envoyer la vapeur de revaporisation dans la bêche alimentaire ou le dégazeur. La chaleur sensible des purges liquides détendues peut aussi éventuellement être récupérée dans un économiseur.

À titre d'exemple, si l'on dispose d'une eau alimentaire de taux alcalimétrique complet égal à 4, le taux de purges est égal à 3,3 % pour une pression inférieure à 15 bars, 8 % pour une pression comprise entre 25 et 35 bars, et 20 % entre 45 et 55 bars.

5.6 CHAUDIÈRES ET GÉNÉRATEURS DE VAPEUR

5.6.1 CHAUDIÈRES

On distingue deux grandes catégories de chaudières, dénommées d'après le fluide qui circule à l'intérieur des tubes : les chaudières à tubes de fumée, et les chaudières à tubes d'eau.

- dans les premières (figures 5.6.1 et 5.6.2), la flamme se développe dans un tube foyer ondulé, puis les fumées parcourent des tubes, en une ou plusieurs passes, l'eau se trouvant à l'extérieur ;

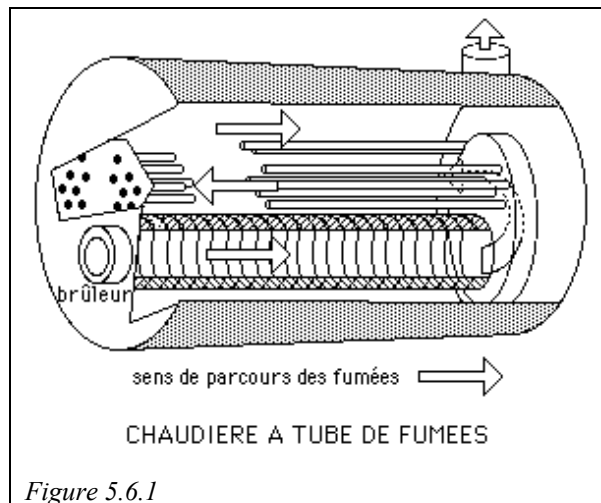


Figure 5.6.1

- dans les secondes (figure 5.6.3), l'eau circule à travers un réseau de tubes, par convection naturelle ou forcée, entre deux ballons placés l'un au-dessus de l'autre (à l'exception des chaudières supercritiques, dont il sera question section 6.1.6). La flamme se développe dans un foyer tapissé de tubes qui absorbent le rayonnement. Un second faisceau de tubes reçoit sa chaleur des fumées par convection. L'eau monte dans les tubes soumis au rayonnement, et descend par le faisceau de convection.

Les chaudières à tubes de fumées permettent d'obtenir des températures de rejet des fumées plus basses (220 à 250 °C) que les chaudières à tubes d'eau (300 °C) sans économiseur, ce qui leur confère un rendement légèrement supérieur.

En revanche, les premières sont limitées à des puissances plus faibles que les secondes, pour des raisons de tenue mécanique et de sécurité (très grand volume d'eau sous pression).

Leur domaine d'utilisation principal est la fourniture de vapeur saturée sous faible pression (< 15 bars), et elles représentent plus de 60 % du parc français de chaudières, contre 20 à 25 % pour les chaudières à tube d'eau, bien adaptées à la fourniture de vapeur surchauffée à moyenne et forte pression.

Une chaudière remplit trois fonctions successives :

- chauffer l'eau d'alimentation pressurisée jusqu'à la température de vaporisation à la pression correspondante ;
- vaporiser l'eau ;
- et enfin la surchauffer à la température désirée.

Elle se comporte donc comme un triple échangeur, et peut être représentée du point de vue des échanges thermiques par le schéma de la figure 5.6.4.

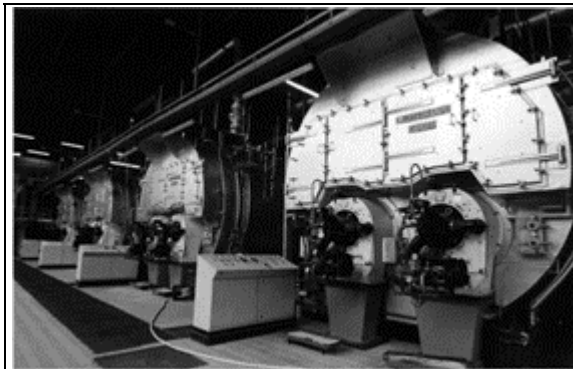


Figure 5.6.2 : Documentation SECC

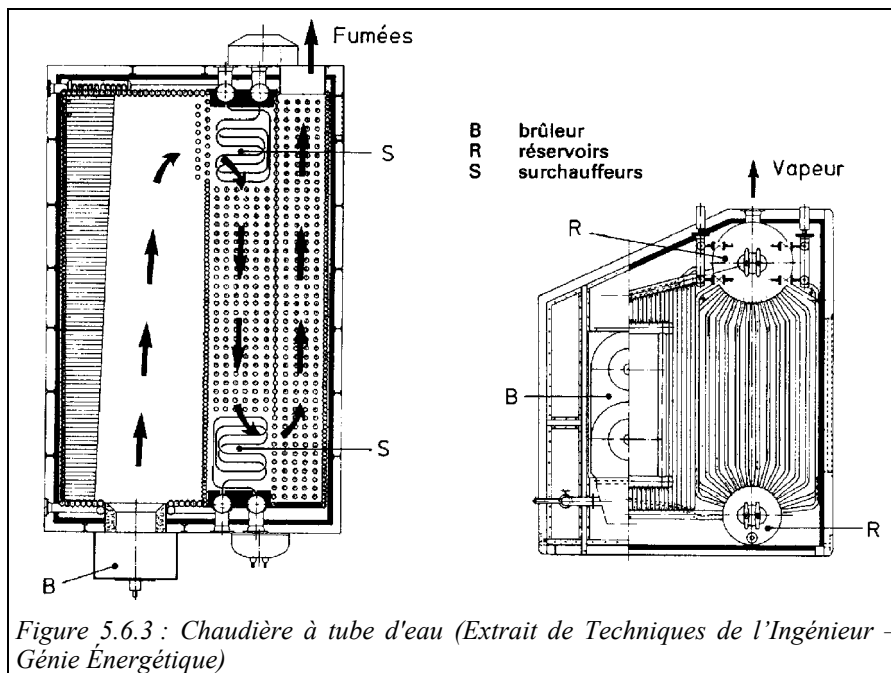


Figure 5.6.3 : Chaudière à tube d'eau (Extrait de *Techniques de l'Ingénieur – Génie Énergétique*)

Dans une chaudière classique à haute température, la température de flamme atteint des températures très élevées (1400 à 1500 °C). La chaleur est principalement transmise à la vapeur sous forme de rayonnement, avec de très grandes densités de flux (100 à 200 kW/m²). Les tubes d'acier voient, pour des raisons économiques, leurs températures limitées à 650 °C au maximum, ce qui demande qu'ils soient très bien refroidis de l'intérieur. Compte tenu des faibles coefficients d'échange des gaz,

ceci n'est possible que si le fluide qui parcourt les tubes est à l'état de liquide ou mieux diphasique.

C'est pour cette raison que le premier échangeur est le foyer-vaporiseur. À la sortie du foyer, la température des fumées a beaucoup baissé (800 - 900 °C), et la convection prend le relais du rayonnement. La deuxième série d'échangeurs (gaz - gaz) correspond aux surchauffeurs. En sortie, les fumées sont refroidies autour de 600 °C, et leur enthalpie résiduelle est alors utilisée dans les économiseurs, échangeurs gaz - liquide permettant d'assurer le chauffage de l'eau jusqu'à sa température d'ébullition à la pression considérée. Le cas échéant, un réchauffeur peut ensuite être utilisé (dans les grandes chaudières) pour préchauffer l'air de combustion.

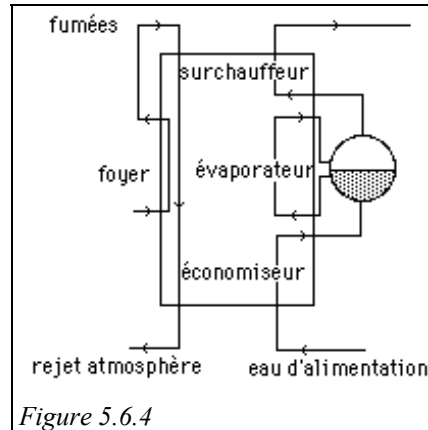


Figure 5.6.4

La température de rejet des fumées dans l'atmosphère doit être aussi basse que possible pour optimiser le rendement de la chaudière. La nécessité d'éviter la condensation des fumées empêche toutefois, lorsqu'elles contiennent des oxydes de soufre pouvant former des acides corrosifs, de les refroidir autant que souhaitable.

Le graphique de la figure 5.6.5 illustre, dans un diagramme enthalpique, les échanges de chaleur au sein d'une chaudière de centrale à vapeur classique. La courbe supérieure correspond au foyer et au refroidissement des fumées, l'inférieure à l'évolution suivie par l'eau. La discontinuité entre les deux segments de la courbe supérieure provient de la contribution radiative du foyer.

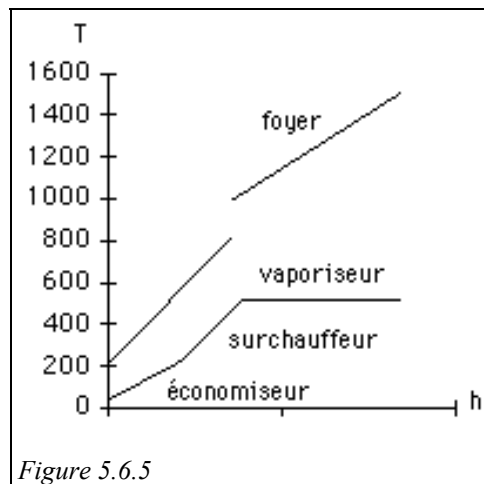


Figure 5.6.5

Comme on le voit, l'échange de chaleur se fait avec des écarts de température très importants, et toujours supérieurs à 180 K. En fin d'économiseur, ils sont supérieurs à 250 K. Si la régulation de la chaudière n'est pas parfaite, il y a dans ces conditions des risques non négligeables pour que la vaporisation commence dans l'économiseur, qui n'est pas conçu pour cela. Pour éviter ce dysfonctionnement, on arrête la chauffe liquide avant d'atteindre la température d'ébullition, en conservant un écart de température d'approche de l'ordre de quelques dizaine de degrés. L'enthalpie manquante est alors fournie par le vaporiseur. Le graphique de la figure 5.6.5 est modifié comme indiqué figure 5.6.6.

5.6.2 GÉNÉRATEURS DE VAPEUR

Conformément à ce qui a été indiqué plus haut, nous appellerons générateurs de vapeur (GV) des appareils où la chaleur n'est pas fournie par une combustion. Parmi eux, nous nous intéresserons ici particulièrement aux appareils destinés à récupérer de la chaleur sur des effluents thermiques, notamment gazeux (ces générateurs de vapeur - récupérateurs (GVR) sont quelquefois appelés chaudières de récupération). Les générateurs de vapeur des centrales nucléaires seront présentés section 6.4.

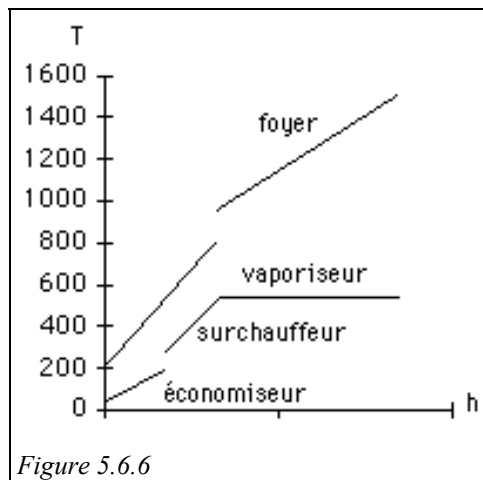


Figure 5.6.6

La plupart des GVR sont des variantes des chaudières à tube d'eau. Les différences essentielles proviennent d'une part de ce que les niveaux de température des effluents sont beaucoup plus faibles que ceux que l'on atteint dans une chaudière, et de ce que l'échange de chaleur se fait uniquement par voie convective. Rien n'interdit plus, dans ces conditions, que le surchauffeur soit placé en amont du vaporiseur, et le schéma de fonctionnement et le diagramme enthalpique du GVR deviennent comme indiqué figure 5.6.7.

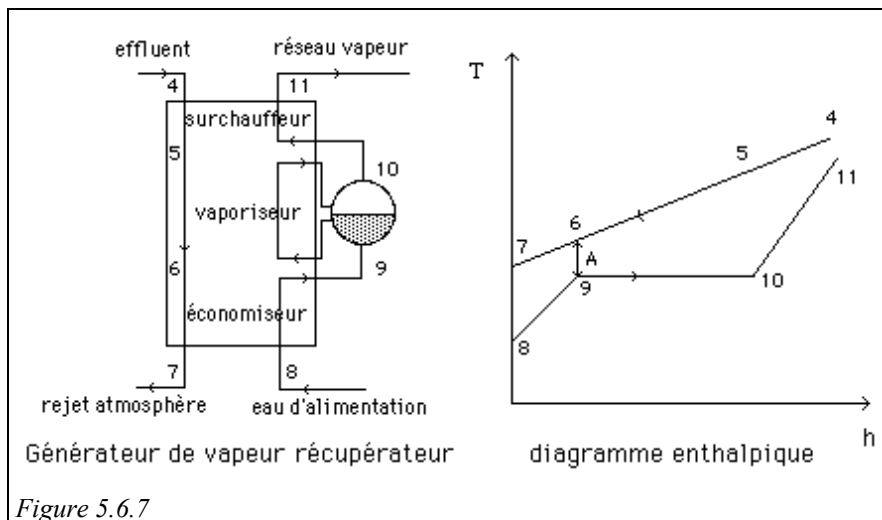


Figure 5.6.7

On voit apparaître sur le diagramme au niveau du point 6, un minimum A dans l'écart de température entre les deux fluides, appelé pincement (cf. section 5.2.6 du tome 1). Ce point joue un rôle fondamental dans le dimensionnement du GVR, puisqu'il représente le plus faible écart de température dans l'installation. Pour réduire le coût des équipements, il est préférable que le pincement ne soit pas trop faible. En revanche, l'optimisation thermodynamique du système complet demande qu'il soit le plus réduit possible.

Une attention particulière doit donc être apportée à la conception du GVR au niveau de ce pincement, qui doit être supérieur à une valeur minimale de l'ordre de 10 à 15 °C, faute de quoi la vaporisation ne peut se faire à la température désirée.

Par ailleurs, la température T_7 de rejet des gaz à l'atmosphère doit être suffisamment élevée pour éviter toute condensation des oxydes de soufre éventuellement présents. Cette température sera donc différente selon le combustible utilisé. Les plus faibles valeurs (< 90 °C) sont obtenues avec du gaz naturel. Avec du fioul léger, on recommande 120 à 130 °C, et 150 - 170 °C avec du fioul lourd.

Mais une seconde contrainte doit être respectée : il faut éviter, en début d'économiseur, toute condensation sur les tubes de l'échangeur à la température à peine supérieure à T_8 , température de condensation de l'eau du cycle à vapeur. Pour cela, il est quelquefois nécessaire de prévoir un économiseur à recirculation partielle.

De la même manière que dans une chaudière de centrale à vapeur classique, on peut être amené à limiter la réchauffe liquide pour éviter tout risque d'ébullition dans l'économiseur. Les écarts de température entre le circuit d'eau et les effluents étant beaucoup plus réduits que dans une chaudière, l'écart de température d'approche pourra être plus faible.

5.6.3 FONCTIONNEMENT DU VAPORISEUR

Le vaporiseur est composé de deux réservoirs superposés et reliés par deux faisceaux de tubulures appelés branche chaude et branche froide (figure 5.6.8). Dans le réservoir supérieur, l'émulsion produite par la vaporisation dans la branche chaude traverse des séparateurs eau-vapeur et des sécheurs. L'eau séparée redescend par la branche froide, et se mélange avec l'eau en provenance de la bache alimentaire.

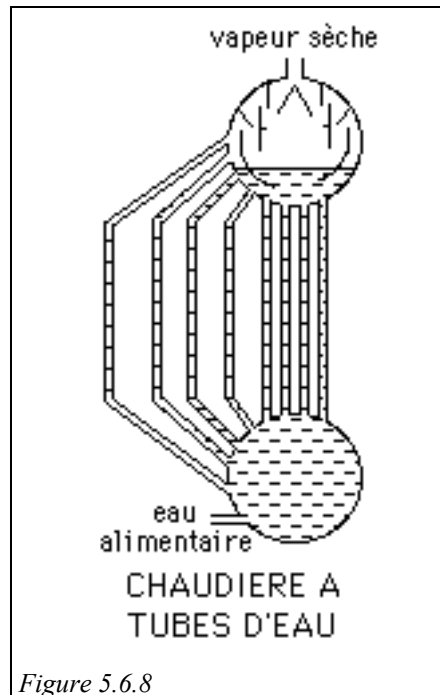


Figure 5.6.8

Dans le vaporiseur, circule un débit total supérieur au débit de vapeur produite. On appelle taux de recirculation τ le rapport :

$$\tau = \frac{\text{débit total}}{\text{débit de vapeur}}$$

Le débit de recirculation est bien évidemment égal à $(\tau - 1)$ fois le débit de vapeur.

Selon les appareils, la circulation de l'eau se fait soit de manière naturelle, soit grâce à une pompe. Les valeurs courantes de τ sont voisines de 8 à 10.