



Rapport technique

Dipl.-Ing. Matthias Raisch, Bosch Industriekessel GmbH



BOSCH

Des technologies pour la vie

Exploitation du pouvoir calorifique

L'utilisation de la technique de condensation permet aux exploitants des installations à vapeur et à eau surchauffée de diminuer leurs coûts d'exploitation et de contribuer à la réduction du CO₂ et à la protection du climat. L'utilisation cohérente de la technique de condensation permet d'amortir les surcoûts en moins de 2 ans.

Pouvoir calorifique inférieur, pouvoir calorifique supérieur et chaleur de condensation

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) représente l'énergie dégagée au cours d'une combustion totale lorsque les fumées sont refroidies à la température de référence, à pression constante. La vapeur d'eau générée par la combustion reste toutefois sous forme gazeuse. Le pouvoir calorifique inférieur indique donc uniquement le volume de chaleur tangible contenue dans les fumées et non pas dans la vapeur d'eau.

Les rendements sont calculés en fonction du pouvoir calorifique inférieur d'un combustible. Par le passé, la vapeur d'eau devait impérativement rester sous forme gazeuse dans les fumées à des températures élevées afin d'éviter la condensation des fumées et la corrosion éventuelle de la chaudière ou du système d'évacuation des fumées, et d'encrasser la cheminée.

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) représente l'énergie dégagée au cours d'une combustion totale lorsque les fumées sont refroidies à la température de référence, à pression constante. Par contre, le pouvoir calorifique supérieur inclut également l'énergie dégagée par la condensation de la vapeur d'eau contenue dans les fumées, autrement dit la chaleur par condensation.

Principe de la technique de condensation

De nos jours, l'énergie contenue dans la vapeur d'eau des fumées peut être exploitée grâce à la technique de condensation. Les matériaux anti-corrosion des échangeurs thermiques, les systèmes d'évacuation des fumées et les cheminées insensibles à l'humidité permettent en effet d'utiliser cette technique sur le long terme sans aucune dégradation. Ce procédé nécessite de prélever, outre la chaleur tangible présente dans les fumées, la chaleur par condensation contenue dans la vapeur d'eau.

Le changement de tendance dans le choix du combustible favorise la technique de condensation

En Europe, le fioul lourd est de moins en moins utilisé. Sur la totalité des chaudières à grand volume d'eau jusqu'à 20 MW installées en France ces deux dernières années, 25 % fonctionnent au gaz, 40 % au gaz naturel/fioul léger avec priorité gaz et 35 % au fioul léger.

La protection de l'environnement et les solutions techniques destinées à améliorer le processus de condensation représentent aujourd'hui les raisons principales de l'utilisation renforcée de gaz naturel.

Si l'on compare les principaux paramètres des combustibles traditionnels, le gaz naturel offre le potentiel maximum en matière de condensation (voir tableau 1).

Avantages du gaz naturel :

- ▶ Volume maximum d'eau dans les fumées
- ▶ Point de rosée maximum des fumées
- ▶ pH maximum des condensats des fumées

Par rapport au fioul domestique, davantage de chaleur par condensation est disponible à un haut niveau de température, c'est-à-dire que les fumées commencent déjà à se condenser à des températures élevées. Les gaz de combustion ne contiennent presque pas de suie ni de soufre. Le nettoyage des surfaces encrassées nécessaire pour maintenir un bon niveau de rendement et éviter les dysfonctionnements est insignifiant. Enfin, le pH des condensats étant supérieur à celui du fioul domestique, le recyclage des condensats est plus simple.

Fioul à faible teneur en soufre parfaitement adapté à la technique de condensation

La présence renforcée du fioul à faible teneur en soufre augmente la demande de systèmes de condensation pour ce type de combustible.

La faible teneur en soufre favorisant une combustion sans suie ni résidus (maximum 50 ppm = 0,005 % en poids par rapport à 0,2 % en poids dans le fioul domestique), la condensation des fumées peut également être appliquée pour ce type de fioul.

Les tests réalisés sur le banc d'essai ont prouvé que, dans la mesure où les cycles de nettoyage prescrits pour l'échangeur thermique sont respectés, il est possible d'atteindre une disponibilité aussi élevée pour le fioul à faible teneur en soufre que pour les combustibles gazeux.

Si l'opération supplémentaire de désulfuration augmente légèrement le prix du fioul à faible teneur en soufre, les surcoûts sont toutefois largement compensés par le gain de rendement et les économies de combustible consécutives (de plus, à partir de 2009, les taxes sont calculées en fonction de la teneur en soufre, ce qui entraîne un avantage fiscal par rapport au fioul domestique).

Si les chaudières sont équipées de combustions mixtes gaz naturel/fioul domestique (par ex. en liaison avec des contrats périodiques de GDF pour le fonctionnement au fioul domestique en cas de grands froids), le condenseur est utilisé avec un by-pass de fumées.

Tableau 1 : Caractéristiques de différents combustibles

Combustible	Pouvoir calorifique inférieur (H _v) [kWh/m ³ /kg]	Pouvoir calorifique supérieur (H _s) [kWh/m ³ /kg]	Rapport H _v /H _s [%]	Point de rosée des fumées [°C]	Condensat théor. [kg/kWh]	Valeur du pH [-]
Gaz naturel „H“	10,35	11,46	110,7	55,6	0,16	2,8 – 4,9
Gaz naturel „L“	8,83	9,78	110,8	55,1	0,16	2,8 – 4,9
Propane	25,89	28,12	108,6	51,4	0,13	2,8 – 4,9
Butane	34,39	37,24	108,3	50,7	0,12	2,8 – 4,9
Fioul domestique *	11,90	12,72	106,9	47,0	0,10	1,8 – 3,7**

* Qualité EL „extra-léger“ : Teneur max. en soufre du combustible de 0,2 % en poids

Qualité du fuel pauvre en soufre : teneur max. en soufre du combustible 50 ppm = 0,005 % en poids

** pH des condensats du fioul à faible teneur en soufre : 2,3 - 4,5

Les rendements de la technique de condensation par rapport au PCI sont supérieurs à 100%

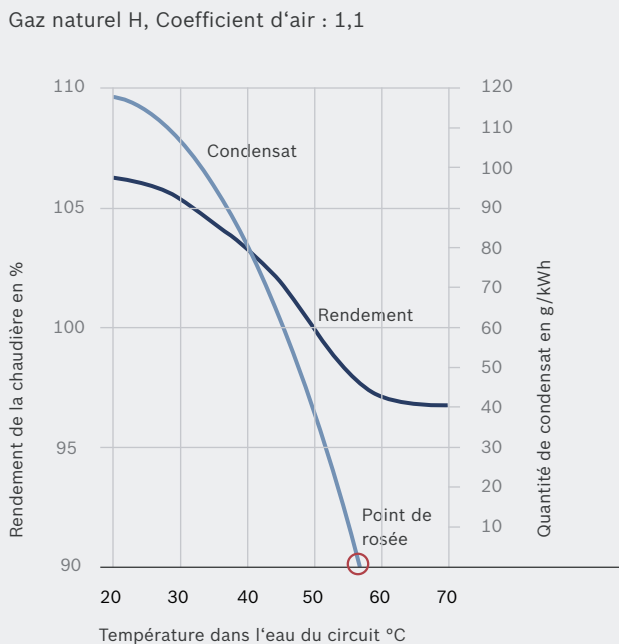
Pour pouvoir être refroidies, les fumées provenant de la combustion doivent être refroidies à une température inférieure à celle du point de rosée. Ceci n'est possible que si les surfaces de chauffe et les systèmes d'évacuation en contact avec les fumées humides sont en inox anti-corrosion.

Les fumées doivent être refroidies en dessous du point de rosée avec des condenseurs appropriés et une eau de chauffage aussi froide que possible.

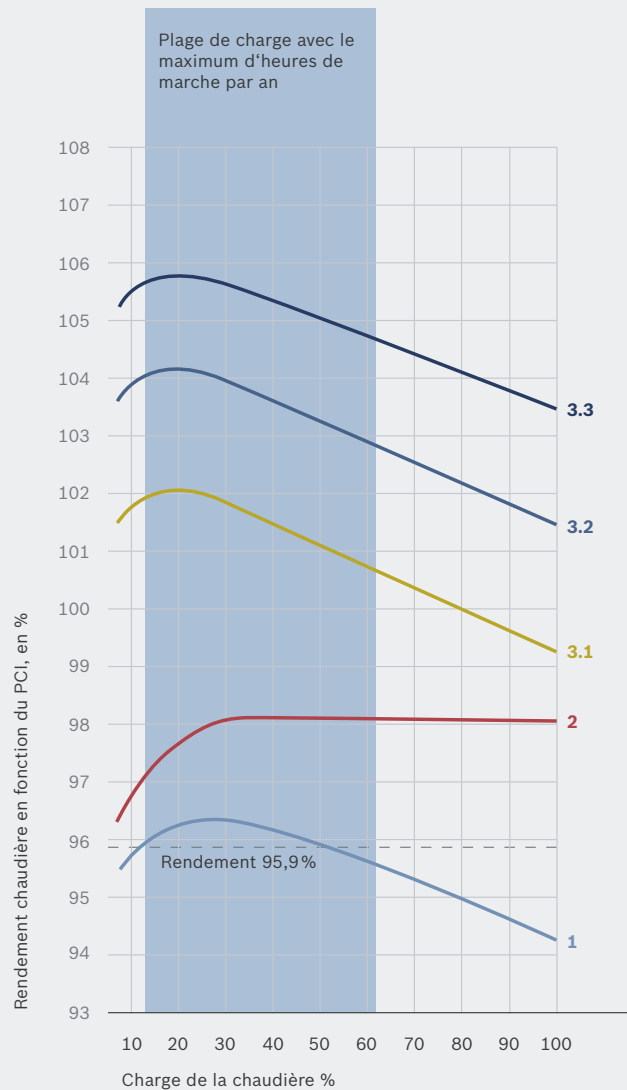
Le graphique 1 montre l'influence du point de rosée des fumées et de la température de l'eau de retour sur le volume de vapeur d'eau en condensation et le rendement chaudière possible.

Le graphique 2 illustre à titre d'exemple les courbes de rendement qui indiquent le potentiel de condensation disponible. En utilisant la technique de condensation, il est possible d'augmenter considérablement les bénéfices économiques et commerciaux en matière de production d'eau chaude/vapeur. Par rapport aux systèmes et échangeurs thermiques traditionnels, la condensation permet de réduire les émissions polluantes ainsi que le volume (et par conséquent les coûts) du combustible de plus de 10%. La condensation contribue donc à préserver le climat et à réduire les émissions de CO₂.

Graphique 1 : Influence de la température de l'eau de chauffage sur le rendement de la chaudière et le volume des condensats avec une combustion au gaz naturel



Graphique 2 : Courbes de rendement pour la condensation (exemple de chaudière à eau surchauffée et combustion au gaz)



- 1 Chaudière sans échangeur thermique 70/50 °C
- 2 Chaudière avec échangeur thermique pour fonctionnement à sec
- 3 Chaudière avec échangeur thermique pour la condensation
- 3.1 Température de départ d'eau 50 °C
- 3.2 Température de départ d'eau 40 °C
- 3.3 Température de départ d'eau 30 °C

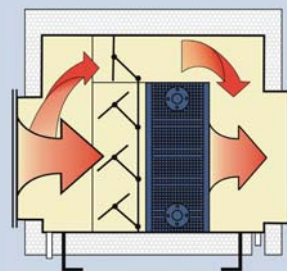
Systèmes de condensation

Généralement, les chaudières à condensation et les chauffe-eau gaz de petites puissances sont entièrement en inox. Par contre, pour des raisons techniques et de coûts élevés, les chaudières de grandes puissances à eau surchauffée pour le chauffage des grands bâtiments et des complexes d'immeubles ne sont pas en inox. Elles sont équipées de condenseurs spéciaux en inox intégrés ou montés séparément (schémas 1 et 2).

Les chaudières à vapeur n'ont pas de systèmes intégrés en raison du concept de récupération de la chaleur des fumées sur deux niveaux (voir paragraphe : « Plages d'application de la condensation sur les chaudières à vapeur ») – on utilise dans ce cas des condenseurs en inox installés côtés fumées en aval de la chaudière (schéma 2).

En tant que module séparé, le condenseur est particulièrement bien adapté à l'extension des installations existantes. La chaudière à eau surchauffée représentée dans le schéma 1 est une construction à tube-foyer – tube des fumées, avec triple parcours des fumées et chambre d'inversion arrière entièrement refroidie par eau. La forme arrondie très fonctionnelle permet de rajouter à la grande surface de chauffage par rayonnement du tube-foyer, une assez grande surface de convection dans le 2^e et 3^e parcours des fumées. Les rendements d'exploitation ainsi obtenus sont supérieurs à 95 % et ce, sans corps de tourbillonnement dans les tubes de fumées ni surfaces d'échange secondaire.

Figure 2 : Échangeur de chaleur sur fumées pour une installation séparée et un équipement complémentaire

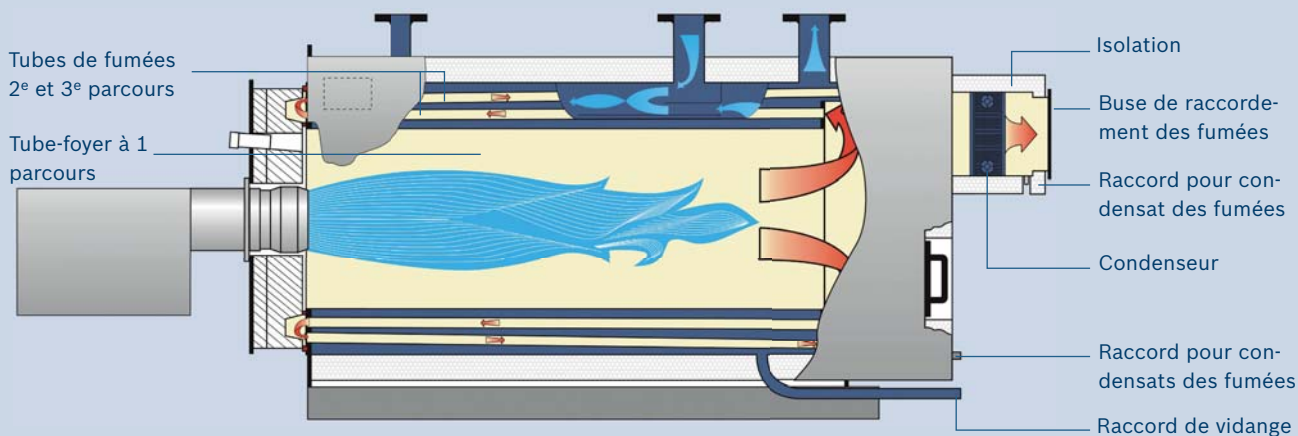


Plages d'application de la condensation sur les installations à eau surchauffée

Il y a quelques années encore, la condensation était essentiellement utilisée sur les petites chaudières à condensation et les chauffe-eau gaz pour le chauffage central et la production d'eau chaude sanitaire dans les petits immeubles collectifs et les maisons individuelles. Depuis peu, on retrouve également la condensation sur des systèmes plus importants.

Concernant les installations de plus petite taille, les systèmes de chaudières à condensation au fioul ont également gagné du terrain (en raison de la disponibilité du fioul pauvre en soufre). Ce n'est qu'une question de temps, jusqu'à ce que l'exploitation du pouce la condensation fioul s'impose aussi dans une gamme de puissance plus importante.

Figure 1 : Coupe de la chaudière UNIMAT avec condenseur intégré



Le système de chauffage et les températures de service réelles représentent des facteurs déterminants quant au niveau de condensation ciblé. Conditions préalables : des systèmes où l'eau de chauffage circule directement par la chaudière et les radiateurs, ainsi qu'une régulation de chaudière en fonction des intempéries pour la régulation continue de l'eau de chaudière. Les nouveaux concepts de chauffages au sol et les grands radiateurs basse température sont particulièrement adaptés aux chaudières à condensation et au fonctionnement par condensation sur toute une année. Beaucoup d'anciennes installations équipées de radiateurs surdimensionnés fournissent une puissance calorifique suffisante pendant la majeure partie de la période de chauffage avec des températures de service faibles, elles sont donc également adaptées aux chaudières à condensation. Pour les systèmes de chauffage à différentes zones de températures, la condensation est également avantageuse en basse température. De nombreux bâtiments ayant fait l'objet d'une isolation thermique ultérieure peuvent également être chauffés à des températures faibles. Les températures de retour peuvent être utilisées pour la condensation la majeure partie de l'année.

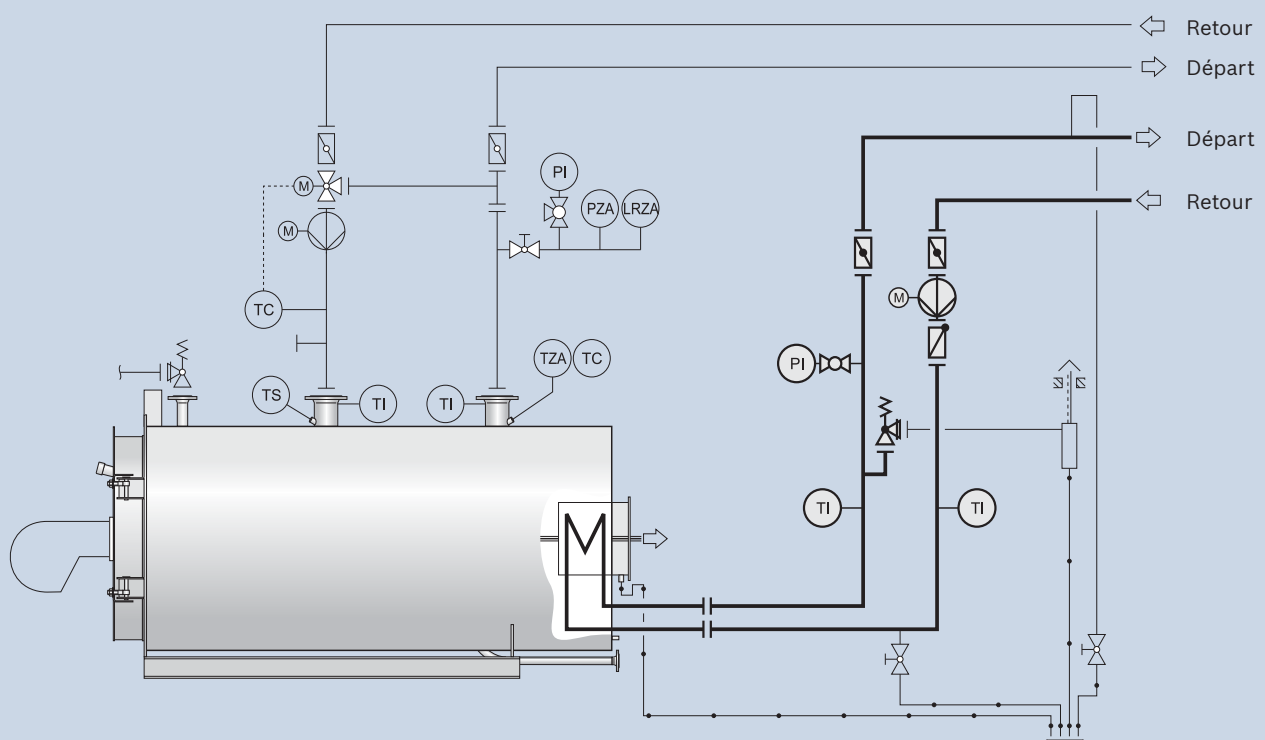
Les générateurs haute pression à eau surchauffée pour des systèmes de chauffage industriels et réseaux urbains, avec circuits primaires pour le chauffage des postes de raccordement et circuits secondaires connectés pour le chauffage des bâtiments, fonctionnent généralement à des températures de retour supérieures à 100 °C, donc largement au-dessus du point de rosée des fumées, si bien que la technique de condensation ne peut pas être appliquée. On utilise toutefois des condenseurs pour un fonctionnement « à sec » permettant d'obtenir des rendements chaudière jusqu'à 98%. Dans ces cas, la technique de condensation n'est possible que dans la mesure où un circuit secondaire basse température est disponible sur l'installation.

Branchement hydraulique de condenseurs sur les installations à eau surchauffée

La condensation maximale est obtenue avec des températures de retour aussi faibles que possible. L'eau de retour à températures minimales (inférieures au point de rosée du combustible) circule par le condenseur dans lequel se forme de la condensation sur les surfaces de chauffe. Les fumées sont refroidies, le circuit basse température réchauffé puis réintroduit dans le réseau.

Avant de pénétrer dans la chaudière, l'eau de retour est mélangée à l'eau de départ par le module de maintien de la température de retour afin d'atteindre la température d'entrée minimale requise de 50 °C (schéma 3). Un injecteur spécial situé au sommet de la chaudière assure un débit et un mélange efficaces à l'intérieur de la chaudière. La plage de régulation des brûleurs affectés, même modulants, peut être exploitée entièrement. On obtient également pour de faibles charges de brûleur de longues périodes de marche avec des températures de fumées faibles et une condensation optimale. Le maintien de la température de retour permet d'éviter des températures d'eau de chaudière inférieures au point de rosée du combustible, ce qui entraînerait la corrosion de la chaudière.

Figure 3 : Branchement hydraulique pour l'exploitation optimale du pouvoir calorifique



Domaines d'application de la condensation pour les chaudières à vapeur

Les générateurs de chaleur dont les températures de fluide se situent entre 150 et 200 °C sont alimentés en eau dégazée à des températures de 85 à 105 °C. En raison des lois de la physique, les températures des fumées de ces chaudières à vapeur sont comprises entre 230 et 280 °C. Pour réduire les pertes par les fumées, on utilise des condenseurs pour réchauffer l'eau. Les fumées sont ainsi refroidies à environ 130 °C, encore dans la zone « sèche » nettement au-dessus du point de rosée.

La condensation n'est pas réalisable avec ces concepts d'énergie. Un deuxième condenseur avec consommateur basse température permet d'obtenir une condensation même avec des générateurs de vapeur haute pression (graphique 3). Ce condenseur est également en inox anti-corrosion, comme tous les parcours de fumées et conduites d'évacuation situés en aval.

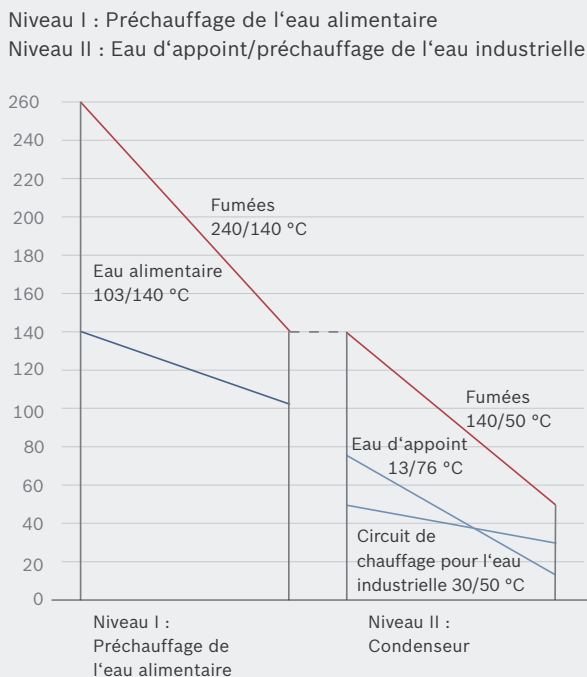
Contrairement aux systèmes de chauffage des bâtiments dont les températures de retour et de système peuvent être nettement déterminées, on trouve dans le secteur industriel des systèmes de chauffage et d'utilisation de la vapeur des plus divers. De ce fait, toutes sortes de systèmes d'économies d'énergie et de récupération de la chaleur se font concurrence. Pour avoir une meilleure vue d'ensemble, il est donc nécessaire d'effectuer des analyses approfondies de tous les fournisseurs et consommateurs d'énergie afin de trouver la solution la plus rentable. Une collaboration étroite entre les exploitants, les concepteurs et les constructeurs de chaudières est indispensable pour trouver les mesures les plus efficaces parmi la profusion de possibilités proposées.

Raccordement des condenseurs sur les installations à vapeur

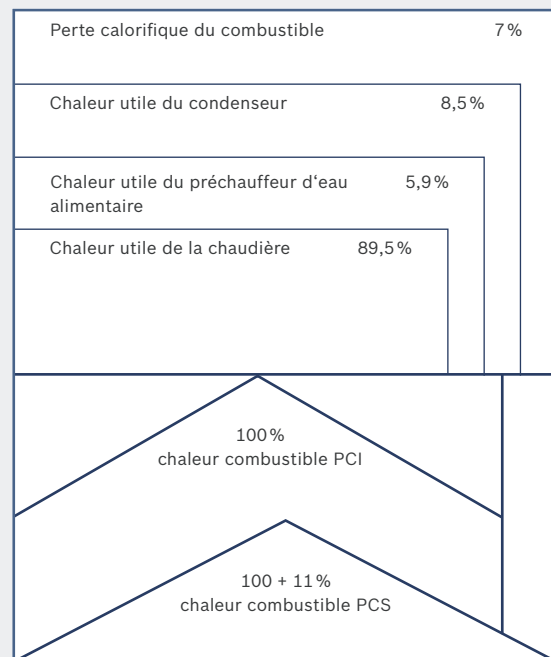
Les chaudières à vapeur permettent de récupérer un maximum de condensats pour alimenter la chaudière en eau. Toutefois, les systèmes de chauffage à vapeur directs ne récupèrent pas les condensats (par ex. fabrication de polystyrène, humidification de l'air, boulangeries industrielles) ou alors les condensats contiennent des substances externes et ne peuvent donc être réutilisés. On constate également des pertes dues à la désalinisation, au désembouage, à l'évaporation ultérieure et aux fuites. Ces quantités sont très variables. Elles peuvent être largement supérieures à la moitié de la vapeur produite et doivent être remplacées par de l'eau d'appoint. Cette eau est généralement disponible après avoir été traitée à maxi. 15 °C et parfaitement adaptée pour le préchauffage dans le condenseur des fumées. Le faible niveau de température permet une bonne condensation des fumées et une utilisation maximale de la condensation. Ce type d'application permet un facteur de simultanéité maximum entre la chaleur disponible et les besoins thermiques (voir schéma 4 – variante 4).

De nombreux sites de production, en particulier dans le secteur de l'industrie alimentaire, ont besoin de grandes quantités d'eau industrielle. Dans ces cas, l'eau adoucie peut être préchauffée dans un condenseur des fumées. Les températures d'eau atteintes se situent entre 50 et 70 °C env. L'eau industrielle peut être encore réchauffée davantage à des températures de prélèvement supérieures au moyen d'un condenseur chauffé à la vapeur et placé en aval (voir schéma 4 – variante B).

Graphique 3 : Récupération de la chaleur des fumées en deux étapes
Température fumées/eau en charge 100 %



Graphique 4 : Bilan calorifique d'un générateur de vapeur avec la technique de chaudières à condensation



Le graphique 4 illustre l'exemple du bilan thermique d'un générateur de vapeur haute pression avec condenseur intégré pour le préchauffage de l'eau alimentaire, et condenseur placé en aval pour le préchauffage de l'eau industrielle ou de l'eau d'appoint, avec un facteur de simultanéité élevé. Les pertes thermiques incluent les pertes liées au réseau et les pertes par rayonnement de la chaudière, de l'échangeur thermique et des conduites ainsi que la part inutilisable de la condensation des fumées pour des raisons liées aux lois de la physique (dimensions limitées des surfaces de chauffe).

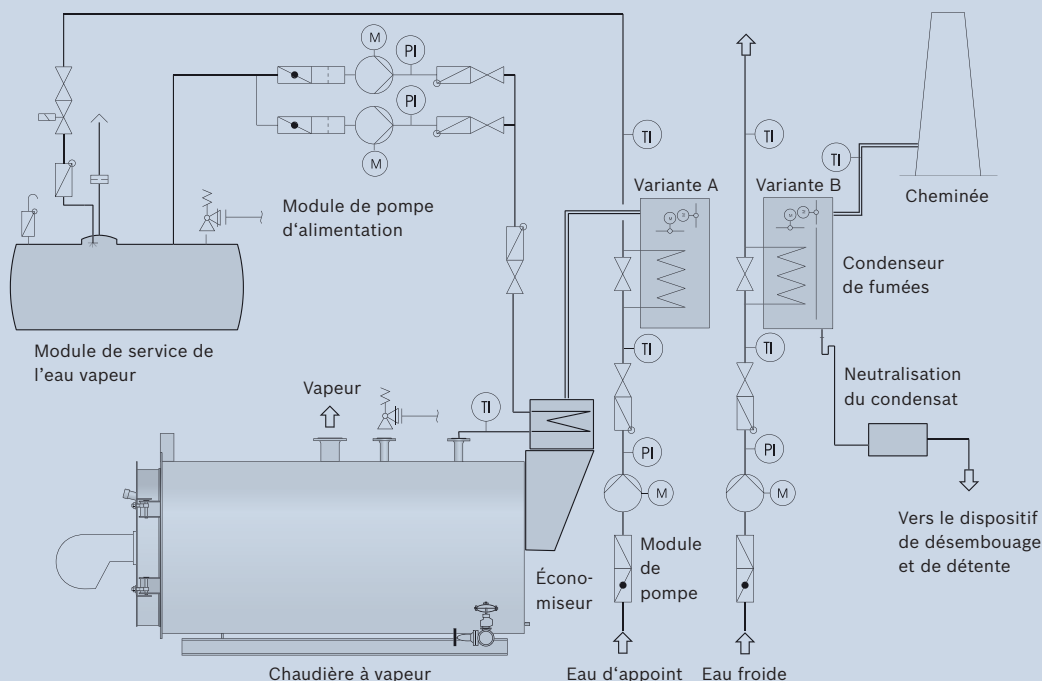
Système d'évacuation des fumées dans le cadre de la technique de condensation

Tous les parcours en contact avec la condensation des fumées doivent être fabriqués dans des matériaux anti-corrosion étanches à l'eau et aux fumées. Les parties du boîtier du condenseur soumises au risque de corrosion ainsi que les conduites d'évacuation des fumées et les cheminées sont généralement en inox. En raison de la condensation, les températures des fumées sont extrêmement faibles, jusqu'à env. 50 °C. Le tirage naturel de la cheminée ne suffit pas pour évacuer les fumées, à peu de frais, par dépression dans les parcours des fumées, comme c'est le cas habituellement. Par conséquent, le système d'évacuation des fumées, cheminée incluse, doit être étanche aux fumées pour pouvoir assurer un fonctionnement en surpression et permettre des sections moins larges. Le brûleur et le ventilateur d'air de combustion de la chaudière doivent pouvoir compenser toutes les pertes de charge côté fumées jusqu'à la cheminée. Ceci exige une conception, une surveillance et une coordination globales.

Écoulement et neutralisation des condensats

Le condenseur et les conduites d'évacuation des fumées ainsi que la cheminée doivent être équipés de dispositifs appropriés pour l'écoulement des condensats. Les volumes théoriques sont indiqués dans le tableau 1. Les volumes réels sont fonction du taux de condensation et se situent généralement entre 40 et 60% du volume théorique indiqué au tableau 1. Le pH (degré d'acidité présent dans les liquides) des condensats de fumées est compris entre 2,8 et 4,9 pour la combustion du gaz naturel et entre 1,8 et 3,7 pour celle du fioul à faible teneur en soufre. Les températures des condensats se situent entre 25 et 55 °C. La réglementation locale en vigueur pour l'introduction des condensats dans le réseau public des eaux usées doit être respectée. Il existe plusieurs systèmes de neutralisation permettant d'augmenter le pH de manière appropriée : filtres avec cartouche renouvelable contenant des cristaux de dolomite (boîte de granulés) sur les petites installations, réservoirs avec dispositif de dosage de soude caustique (neutralisation liquide) sur les grandes installations.

Figure 4 : Schéma synoptique d'une chaudière à vapeur haute pression avec deux niveaux de condensation (économiseur/condenseur des fumées)



Calcul de rentabilité

Pour analyser les économies de combustible et les durées d'amortissement, il est nécessaire de considérer chaque cas individuellement et d'utiliser des méthodes éprouvées. Une étude globale n'est pas très efficace. Les critères ci-dessous sont à prendre en considération pour comparer les investissements d'une chaudière à eau surchauffée traditionnelle avec son condenseur intégré :

- ▶ Coûts liés au raccordement hydraulique et au condenseur intégré en inox, avec by-pass pour les brûleurs Dual
- ▶ Frais de neutralisation et d'écoulement des condensats à partir de 200 kW
- ▶ Le cas échéant, coûts relatifs aux conduites d'évacuation des fumées en inox, la cheminée étant de toute façon généralement en inox
- ▶ Dans la plupart des cas, la combustion n'entraîne pas de surcoûts, l'augmentation des pertes de charge côté fumées est compensée par la réduction du débit des fumées suite aux économies de combustible.

En tenant compte de ces critères, l'investissement supplémentaire pour une chaudière à eau surchauffée de 2,5 MW avec condenseur intégré, par rapport à une chaudière à eau surchauffée traditionnelle, sans cheminée dans les deux cas, est d'env. 20000,- €. Avec une charge moyenne de 60%, ces coûts sont amortis au bout de 4200 heures de marche env., avec un rendement supérieur de 7,5% pour la chaudière à condensation et un prix mixte du gaz naturel de 40 centimes/m³.

Potentiel de condensation

Avec les réseaux de chaleur de proximité et le raccordement direct de tous les consommateurs thermiques, le potentiel de condensation encore largement inutilisé est important. Davantage de calculs de rentabilité et d'analyses relatives aux possibilités d'utilisation de la condensation des fumées sur les réseaux de chaleur de proximité existants, prouveraient souvent que le volume de chaleur pendant la majeure partie de la période de chauffage est également amené un niveau de température faible. La technique de condensation pourrait être utilisée dans de nombreux cas. Les fournisseurs de chaleur pourraient améliorer leur compétitivité tout en contribuant activement à la protection de l'environnement.

Selon les connaissances actuelles, le principe de condensation peut également être utilisé sur les générateurs de vapeur haute pression. Elle peut être largement appliquée au secteur industriel dans la mesure où le concepteur effectue une analyse détaillée des consommateurs thermiques et où il prend davantage en compte le réchauffage sur plusieurs niveaux avec des circuits basse température. Des concepts de chauffage modifiés pourraient permettre l'application de la technique de condensation dans de nombreux domaines de l'approvisionnement industriel en vapeur.

Les investissements supplémentaires sont financés par la diminution des quantités de combustible tant sur les installations à eau surchauffée que sur les chaudières à vapeur. La réduction des émissions polluantes permet de préserver l'environnement et la réduction du CO² contribue à la protection du climat.

Les installations de production:

Usine de fabrication 1 Gunzenhausen
Bosch Industriekessel GmbH
Nürnberger Straße 73
91710 Gunzenhausen
Allemagne

Usine de fabrication 2 Schlungenhof
Bosch Industriekessel GmbH
Ansbacher Straße 44
91710 Gunzenhausen
Allemagne

Usine de fabrication 3 Bischofshofen

Bosch Industriekessel Austria GmbH
Haldenweg 7
5500 Bischofshofen
Autriche

www.bosch-industrial.com

© Bosch Industriekessel GmbH | Pictures only
examples | Subject to modifications | 07/2012 |
TT/SLI_fr_FB-Brennwertnutzung_01