

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

CHAUDIÈRES BIOMASSE A HAUT RENDEMENT
ÉTAT DES CONNAISSANCES ET NOUVEAUX DÉVELOPPEMENTS

HIGH-EFFICIENCY BIOMASS BOILERS
STATE OF KNOWLEDGE AND NEW DEVELOPMENTS

décembre 2021

C. GUERMONT, F. STREIFF – OWLYENERGY
P. LEBOS – Expert indépendant

Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Chaudières biomasse à haut rendement. Etat des connaissances et nouveaux développements, 2021, 90 p, n°20-0254/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

© RECORD, 2021

RESUME

Les chaudières à biomasse ont bénéficié ces dernières années de nombreuses améliorations et développements, que ce soit au niveau des procédés de conversion, traitements des fumées (particules fines, COV, NOx...) et diversification des combustibles utilisés. Elles sont aujourd'hui utilisées pour certains procédés industriels, installations de cogénération, ou pour alimenter des réseaux de chaleur.

L'étude vise à réaliser un état de l'art des connaissances et nouveaux développements en matière de biomasse-énergie en France et à l'international. Basé sur des entretiens réalisés auprès de différentes parties prenantes et l'analyse de publications commerciales, scientifiques et brevets. Cet état de l'art (non exhaustif) évalue les avantages et inconvénients de systèmes et/ou concepts visant à améliorer les performances énergétiques et environnementales des chaudières biomasse principalement par condensation des fumées, et à caractériser les principaux freins à leur développement et opportunités.

MOTS CLES

Chaudière, biomasse, gaz, haut rendement, récupération chaleur, chaudière à condensation, combustion étagée, humidité de l'air, fumées, PAVE, BEVP, pompe à vapeur d'eau

SUMMARY

Biomass boilers have benefited in recent years from multiple improvements and developments, whether in terms of conversion processes, flue gas treatment (fine particles, VOCs, NOx, etc.) and diversification of the fuels used. They are used today for certain industrial processes, cogeneration installations, or to feed district heating.

This study aims to achieve a state of the art of knowledge and new developments in biomass energy in France and internationally. Based on interviews of different stakeholders and on the analysis of commercial and scientific publications, and on patents. This state of the art (non-exhaustive) assesses the advantages and disadvantages of systems and / or concepts aiming at improving the energy and environmental performances of biomass boilers by flue gas condensing mainly; and to characterize the main obstacles to their development and opportunities.

KEY WORDS

Boiler, biomass, gas, high efficiency, boiler equipped with vapor pump system, heat recovery, condensing boiler, staged combustion, air humidity, flue gas, PAVE, BEVP, water vapor pump

Contexte de l'étude et objectifs

Contribuant à plus de 10% de la consommation finale en énergie de l'Union Européenne (CE, 2019)¹, la biomasse énergie prend une place de plus en plus importante dans le paysage énergétique européen. Parmi les modes de conversion les plus connues et répandues figurent aujourd'hui la méthanisation qui consiste à dégrader de la matière organique dans un milieu dépourvu d'oxygène au sein d'un digesteur, et la combustion qui consiste à brûler la matière dans une chaudière. Dans ces cas, la biomasse peut être utilisée pour produire directement de la chaleur sous forme de vapeur ou eau chaude et/ou de l'électricité en cogénération via l'entraînement d'une turbine. La biomasse peut aussi être transformée en gaz combustible à travers un procédé de gazéification. Le gaz de synthèse ainsi produit est ensuite acheminé jusqu'au brûleur pour fournir de la chaleur de la même façon qu'avec du gaz naturel. Chacun de ces modes dispose de ses propres avantages et inconvénients du point de vue technique, organisationnel, économique et environnemental. Leur caractère durable dépend notamment des caractéristiques des ressources utilisées (composition, mode de production, de collecte, de traitement, de transport et de stockage), de leur pérennité sur la durée de vie de l'installation, du type d'utilités qu'elles permettent de produire et de leur articulation avec les autres usages tels que l'alimentation humaine ou animale, la fabrication de matériaux ou produits biosourcés.

L'objectif de la présente étude est de faire un état des connaissances relative à la biomasse énergie et en particulier des techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique des chaudières par condensation des fumées. Après une présentation, au chapitre II, du cadre législatif et normatif relatif à la biomasse énergie, et une introduction aux différentes définitions et classifications connexes, le chapitre III rappelle les différents procédés impliqués dans la valorisation énergétique de la biomasse. Le chapitre IV s'intéresse ensuite aux particularités de la biomasse et aux phénomènes physico-chimiques impliqués dans sa combustion ; tandis que le chapitre V passe en revue les différents types de pertes concourant à la diminution des performances énergétiques des chaudières. Le chapitre VI s'intéresse aux différentes techniques d'amélioration du rendement énergétique des chaudières ; et procède à une analyse croisée entre les équipements utilisés en chaudières biomasse et ceux utilisés pour les chaudières gaz. Enfin, le chapitre VII est consacré à l'analyse critique de nouveaux développements basés sur la condensation des fumées, et notamment sur les dernières expérimentations réalisées sur les pompes à vapeur d'eau (PAVE).

Analyse de procédés basés sur la condensation des fumées

L'étude s'est intéressée en particulier à différentes techniques d'amélioration de l'efficacité de la combustion par condensation des fumées. Quatre systèmes brevetés (ou ayant fait l'objet de dépôt de brevet) ont fait l'objet d'une analyse approfondie à savoir :

- La chaudière biomasse du constructeur danois Dall Energy ;
- Les laveurs-condenseurs de la société française Starklab ;
- Les laveurs-condenseurs CSX du constructeur finlandais Caligo Oy ;
- La pompe à vapeur d'eau de la société française CIEC, ex-Seccacier.

Context of the study and objectives

Contributing to more than 10% of final energy consumption in the European Union ², biomass energy is playing an increasingly important role in the European energy landscape. Among the most well-known and widespread conversion methods, there is the methanization which degrades organic matters in an oxygen-free environment in a digester, and the combustion, which consists of burning the material in a boiler. In these cases, the biomass can be used to directly produce heat in the form of steam or hot water and / or cogeneration electricity via a turbine. Biomass can also be transformed into fuel gas through a gasification process. The synthesis gas is then fed to the burner to provide heat in the same way as with natural gas. Each of these modes has its own advantages and disadvantages from a technical, organizational, economic and environmental point of view. Their sustainability depends in particular on the characteristics of the resources used (composition, mode of production, collection, treatment, transport and storage), their durability over the lifetime of the installation, the type of utilities they produce and their articulation with other uses such as human or animal feed, the manufacture of bio-based materials or products.

The objective of this study is to draw up an overview of knowledge related to biomass energy, and in particular, techniques for improving the energy efficiency of boilers by gas condensing. After a presentation, in Chapter II, of the legislative and normative framework relating to biomass energy, and an introduction to the various definitions and related classifications, Chapter III recalls the different processes involved in energy recovery from biomass. Chapter IV then looks at the peculiarities of biomass and the physicochemical phenomena involved in its combustion; while chapter V reviews the different types of losses contributing to the reduction in the energy performance of boilers. Chapter VI examines the various techniques for improving the energy efficiency of boilers; and carries out a cross-analysis between the equipment used in biomass boilers and those used for gas boilers. Finally, Chapter VII is devoted to the critical analysis of new developments based on flue gases condensing, and in particular on the latest experiments carried out on water vapor pumps (see extract below).

Analysis of processes based on flue gas condensing

The study looked in particular at different techniques for improving the efficiency of combustion by condensing flue gases. Four patented systems have been the subject of in-depth analysis:

- The biomass boiler from the Danish manufacturer Dall Energy;
- The scrubber-condenser from the French company Starklab;
- The scrubber-condenser from the Finnish manufacturer Caligo Oy;
- The water vapor pump from the French company CIEC, ex-Seccacier.

Reminder on flue gas condensing

All combustion generates water vapor depending on the hydrogen content of the fuel. This steam production requires energy which is wasted in the combustion process (if not recovered). When the combustion is complete, this energy is particularly high for wet biomass because its water content

Rappel sur la condensation des fumées

Toute combustion génère de la vapeur d'eau fonction de la teneur en hydrogène du combustible. Cette production de vapeur requière de l'énergie qui est une perte pour le procédé de combustion. En cas de combustion complète, cette énergie est particulièrement élevée pour la biomasse humide dont le contenu en eau se retrouve intégralement dans les fumées. Elle peut être valorisée grâce à un économiseur ou un condenseur. Dans le premier cas, l'économiseur valorise uniquement la chaleur sensible en abaissant la température des fumées sans atteindre leur point de rosée (l'eau reste ainsi à l'état gazeux). Cette solution permet généralement de gagner entre 3 et 6 points de rendement supplémentaire pour un fonctionnement à puissance nominale. Dans le deuxième cas, le condenseur permet de récupérer à la fois la chaleur sensible et latente grâce au changement de phase de l'eau contenue dans les fumées. Pour ce faire, la température des fumées est abaissée en dessous du point de rosée. Cette technique permet d'améliorer l'efficacité thermique de l'ordre de 15%.

Deux voies existent pour condenser les fumées :

- La voie humide qui consiste à pulvériser de l'eau dans les fumées et à récupérer l'énergie du condensat ;
- La voie sèche qui consiste à récupérer l'énergie contenue dans les fumées.

L'efficacité de la condensation des fumées dépend principalement de :

- La température des fumées ;
- La température de la source froide (température « retour réseau » par exemple) ;
- La composition des fumées dont la teneur en humidité (variable selon le type de combustible) ;
- Et de la technique de condensation et notamment du design du condenseur ;
- L'excès d'air (O_2) contenu dans les fumées (cf. Figure 2).

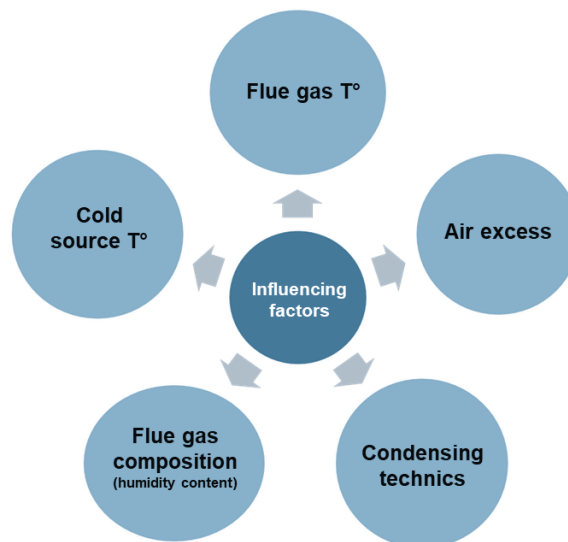
is transferred to the flue gases. This energy can be recovered by using an economizer or a condenser. In the first case, the economizer only recovers the sensible heat by lowering the temperature of the flue gases without reaching their dew point (the water thus remains in the gaseous state). This solution generally allows to gain between 3 and 6 additional efficiency points for operation at nominal power. In the second case, the condenser allows to recover both sensible and latent heat thanks to the phase change of the water contained in flue gases. To do this, the flue gas temperature is lowered below the dew point. This technique improves thermal efficiency by around 15%.

There are two ways to condense flue gases:

- - The wet process, which consists of spraying water into flue gases and recovering energy from the condensate;
- - The dry process which consists of recovering the energy contained in flue gases.

The effectiveness of flue gases condensing mainly depends on:

- The temperature of flue gases;
- The temperature of the cold source used to condensate flue gases (e.g. the temperature of the "network return" in the case of district heating);
- The composition of the flue gases including their moisture content (variable according to types of fuel);
- The condensing technique and in particular the design of the condenser;
- The excess air (O_2) contained in flue gases (see Figure 2).



¹ Chiffre estimé à partir des données Eurostat 2018 et des données rapportées par les Etats-Membres

² Figure estimated from Eurostat 2018 and from data reported by Member-States

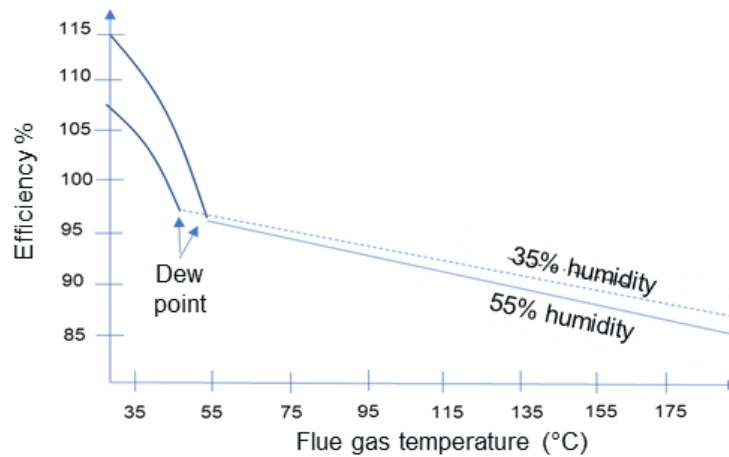


Figure 1 : Rendement d'une chaudière biomasse équipé d'un condenseur en fonction de la température des fumées et du taux d'humidité (RECORD, 2021)

Figure 1: Evolution of the energy efficiency of a biomass boiler equipped with a condenser according to flue gases temperature and humidity content (RECORD, 2021)

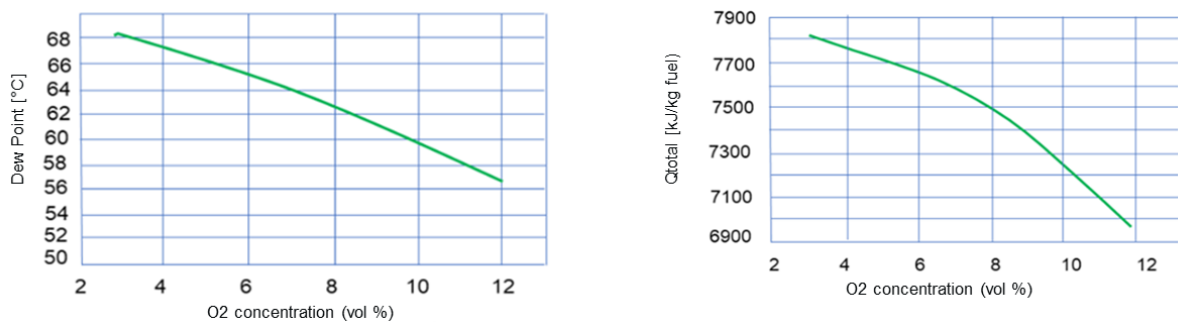


Figure 2 : Température du point de rosée et quantité de chaleur récupérable en fonction en fonction du volume d'O₂ dans les fumées (RECORD, 2021)

Figure 2: Dew point temperature and amount of recoverable heat as a function of the volume of O₂ in the flue gases (RECORD, 2021)

Chaudière biomasse du constructeur Dall Energy

Le fabricant de chaudières danois Dall Energy a développé et breveté plusieurs systèmes basés sur l'humidification d'air de combustion et la condensation des fumées. Parmi eux, figure le brevet mondial WO2006/DK50049 dont une des applications concerne la combustion de biomasse solide avec transfert de la chaleur des fumées par injection d'eau (cf. Figure 3).

Les performances annoncées pour la combustion de bois humide (humidité de 45%/O₂ : 8,5%) dans une chaudière d'une puissance nominale de 7,8 MW donnent un rendement de 113,3 % (PCI) contre 96,3% sans injection d'air humide, et un rendement de 103,3% pour la combustion de granulés de bois, contre 91% lors d'une combustion dite 'classique'.

The biomass boiler of the Danish company Dall Energy

Danish boiler manufacturer Dall Energy has developed and patented several systems based on combustion air humidification and flue gas condensation. Among them, there is the world patent WO2006/DK50049 which relates to the combustion of solid biomass with transfer of heat from the flue gases by injection of water (see Figure 3).

The performances announced for the combustion of wet wood (humidity 45% / O₂: 8.5%) in a such boiler with a nominal power of 7.8 MW give an efficiency of 113.3% (PCI) against 96.3 % without injection of humid air, and an efficiency of 103.3% for the combustion of wood pellets, against 91% during a so-called 'conventional' combustion.

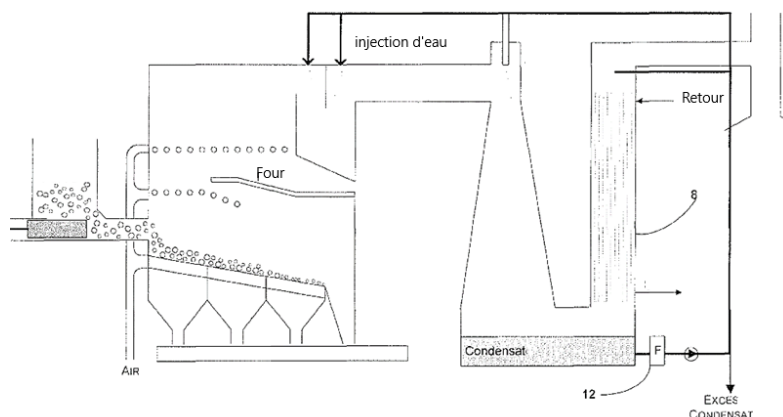


Figure 3 : Schéma de principe d'une chaudière pour la combustion de combustibles solides avec humidification d'air - ©Dall Energy

Figure 3: Schematic diagram of humidified fuel combustion, heat recovery from flue gases & cleaning by water injection - ©Dall Energy

Ce brevet a donné lieu à d'autres inventions notamment à travers le brevet mondial WO2010/025739. Une de ses particularités est de refroidir les fumées en les faisant parcourir l'intérieur d'un refroidisseur cylindrique doté de point d'injection d'eau. Les gaz produits effectuent ainsi un mouvement de rotation tangentielle aux parois latérales du cylindre afin que l'eau pulvérisée soit complètement évaporée et que la température du gaz due à l'évaporation de l'eau soit comprise entre 100 et 400°C. Une des caractéristiques de ce système est sa compacité (ratio entre la hauteur et le diamètre du refroidisseur inférieur à 5) qui le rend particulièrement adapté aux petites et moyennes installations. Néanmoins, cette invention ne semble pas exploitée par la société et aucun résultat expérimental sur les performances du système ne semble avoir été publié. Par ailleurs, les coûts d'exploitation associés à la consommation d'électricité pour refroidir l'eau, la pulvériser et maintenir la vitesse des fumées supérieure à 5m/s mériteraient d'être investigués dans le cadre d'une étude ad hoc.

This patent has led to other inventions, and in particular to the world patent WO2010 / 025739. One of its peculiarities is to cool the flue gases by running them inside a cylindrical cooler equipped with a water injection point. The gases produced thus perform a rotational movement tangentially to the side walls of the cylinder so that the sprayed water is completely evaporated and the temperature of the gas due to the evaporation of the water is between 100 and 400°C. One of the characteristics of this system is its compactness (ratio between the height and the diameter of the cooler less than 5) which makes it particularly suitable for small and medium-sized installations. Nevertheless, this invention does not seem to be exploited by the company and no experimental results on the performance of the system seem to have been published. Furthermore, the operating costs associated with the consumption of electricity to cool the water, spray it and maintain the smoke velocity above 5m/s, should be investigated with an ad hoc analysis.

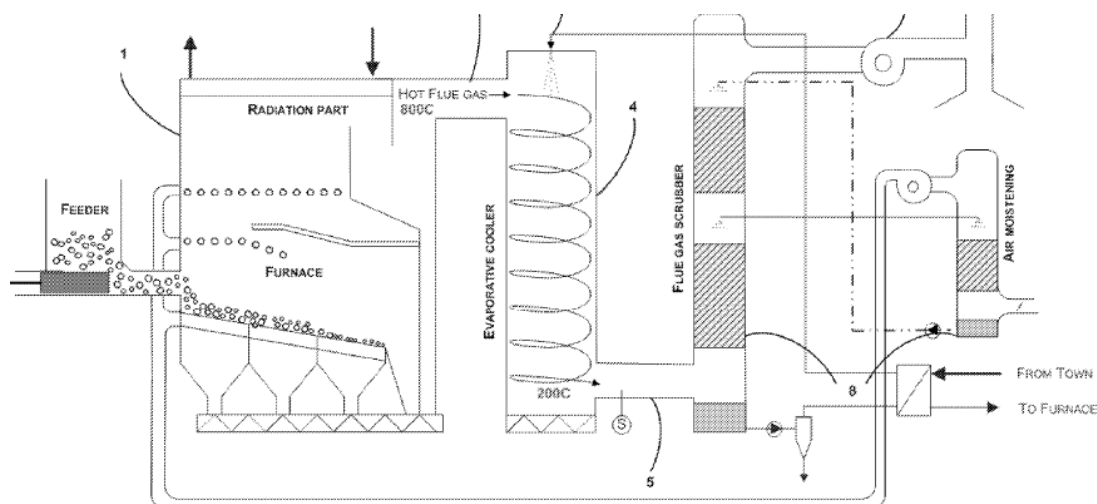


Figure 4 : Schéma de principe de lavage et récupération de chaleur sur les fumées ©Dall Energy

Figure 4: Principle diagram of flue gases washing and heat recovery ©Dall Energy

Selon le fondateur, les modèles de chaudières à biomasse commercialisées actuellement par la société se rapprochent davantage du dépôt WO 2010/149173 intitulé 'Méthode et système pour le nettoyage et de récupération de chaleur à partir de gaz chauds'. Ce dépôt dévoile à la fois un moyen de nettoyer les fumées et de récupérer leur énergie par injection d'eau, de séparer les polluants du scrubber, mais aussi des méthodes pour l'humidification de l'air du réacteur thermique.

According to the founder, the models of biomass boilers currently sold by the company are closer to the filing WO 2010/149173 entitled "Method and system for cleaning and heat recovery from hot gases". This deposit reveals both a way to clean the flue gases and recover their energy by injecting water to separate the pollutants from the scrubber, but also methods for humidifying the air in the thermal reactor.

Cette humification permettrait à la fois de réduire les phénomènes d'encrassement dus aux cendres et réduire la formation de NOx, et aussi d'augmenter le pouvoir calorifique du syngaz en cas de gazéification préalable de la biomasse. La Figure 5 illustre une des configurations exposées dans ce dépôt, tandis que le Tableau 1 présente les résultats expérimentaux publiés par la société.

This humification would both reduce the phenomena of fouling due to ash, and reduce the formation of NOx, and also increase the calorific value of the syngas in the event of prior gasification of the biomass. Figure 5 illustrates one of the configurations exposed in this deposit, while Table 1 shows the experimental results published by the company.

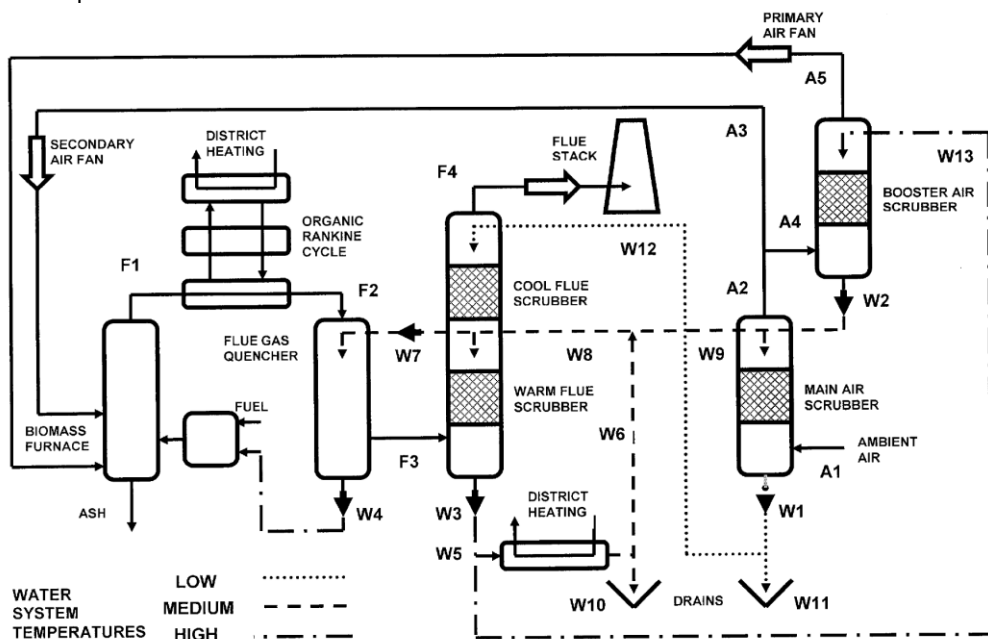


Figure 5 : Exemple de configuration proposé par Dall Energy dans le dépôt de brevet WO 2010/149173 pour la récupération de chaleur sur les fumées par condensation humide ©Dall Energy
Figure 5: Example of configuration for heat recovery from wet flue gases condensing proposed by Dall Energy in the patent application WO2010/149173 ©Dall Energy

WATER SYSTEM	Fuel Moisture											
	53%		50%		40%		30%		20%		10%	
	(°C)	(kg/s)	(°C)	(kg/s)	(°C)	(kg/s)	(°C)	(kg/s)	(°C)	(kg/s)	(°C)	(kg/s)
Flue Gas Quencher												
W7 INLET	49,0	0,2417	49,0	0,2488	49,0	0,2660	49,0	0,2765	49,0	0,2829	49,0	0,2869
W4 EXIT	79,8	0,0000	79,3	0,0068	78,2	0,0233	77,3	0,0330	76,5	0,0388	75,9	0,0421
Warm Flue Scrubber												
W8 INLET	49,0	8,0766	49,0	7,9722	49,0	7,6807	49,0	7,4552	49,0	7,2751	49,0	7,1283
NN FROM ABOVE	49,0	1,4594	49,0	1,5029	49,0	1,6216	49,0	1,7098	49,0	1,7777	49,0	1,8312
W7 TO QUENCHER	49,0	0,2417	49,0	0,2488	49,0	0,2660	49,0	0,2765	49,0	0,2829	49,0	0,2869
W3 EXIT	76,8	9,7427	76,3	9,6642	75,2	9,4457	74,3	9,2760	73,5	9,1403	72,9	9,0291
Cool Flue Scrubber												
W12 INLET	23,0	1,4022	23,0	1,4440	23,0	1,5582	23,0	1,6429	23,0	1,7082	23,0	1,7596
NN TO BELOW	49,0	1,4594	49,0	1,5029	49,0	1,6216	49,0	1,7098	49,0	1,7777	49,0	1,8312
Warm Air Scrubber												
W13 INLET	76,8	0,6644	76,3	0,6851	75,2	0,7463	74,3	0,7979	73,5	0,8419	72,9	0,8800
W2 EXIT	49,0	0,6368	49,0	0,6570	49,0	0,7170	49,0	0,7677	49,0	0,8110	49,0	0,8485
Cool Air Scrubber												
W2 FROM BOOSTER	49,0	0,6368	49,0	0,6570	49,0	0,7170	49,0	0,7677	49,0	0,8110	49,0	0,8485
W9 FROM MAIN	49,0	1,0016	49,0	1,0072	49,0	1,0186	49,0	1,0229	49,0	1,0232	49,0	1,0210
W1 EXIT	23,0	1,5794	23,0	1,6043	23,0	1,6732	23,0	1,7261	23,0	1,7681	23,0	1,8022
Misc'l Lines												
W5 TO DISTR. HEAT	76,8	9,0783	76,3	8,9791	75,2	8,6993	74,3	8,4782	73,5	8,2984	72,9	8,1491
W6 TO MAIN	49,0	9,0782	49,0	8,9794	49,0	8,6994	49,0	8,4781	49,0	8,2983	49,0	8,1493
W10 WARM DRAIN	49,0	0,0001	49,0	0,0000	49,0	0,0000	49,0	0,0000	49,0	0,0000	49,0	0,0000
W11 COOL DRAIN	23,0	0,1772	23,0	0,1603	23,0	0,1150	23,0	0,0832	23,0	0,0599	23,0	0,0425
HEAT RECOVERY		KJ		KJ		KJ		KJ		KJ		KJ
ORC CYCLE		1329,8		1330,0		1330,3		1330,5		1330,7		1330,9
DISTRICT HEATING		1054,4		1027,3		952,9		896,2		851,5		815,4
FUEL LCV INPUT		2000,0		2000,0		2000,0		2000,0		2000,0		2000,0
EFFICIENCY (%)		119,2		117,9		114,2		111,3		109,1		107,3

Tableau 1 : Résultats expérimentaux publiés par Dall Energy dans le dépôt de brevet WO 2010/149173 ©Dall Energy
Table 1: Experimental results published by Dall Energy in the patent application WO 2010/149173 ©Dall Energy

La société exploiterait par ailleurs le dispositif décrit dans le dépôt WO2010/022741 intitulé « Procédé et système de production d'un gaz chaud propre à base de combustibles solides. Ce dispositif porte sur un moyen de conversion de combustible solide (dont biomasse) grâce à un procédé de combustion étagée verticale basé sur la pyro-gazéification, la combustion de syngaz et la récupération de chaleur. Ce brevet fait d'ailleurs référence à un autre dépôt de brevet de la société portant sur une technique de récupération de chaleur sur fumée par injection d'eau et augmentation du point de rosée (WO2007/036236).

The company would also exploit commercially the device described in filing WO2010 / 022741 entitled "Process and system for producing a clean hot gas based on solid fuels. This device relates to a means of converting solid fuel (including biomass) using a vertical staged combustion process based on pyro-gasification, combustion of syngas and heat recovery. This patent also refers to another patent filing of the company relating to a technique for recovering heat from smoke by injecting water and increasing the dew point (WO2007 / 036236).

Synthèse des avantages et inconvénients de la chaudière Dall Energy

Synthesis of advantages and drawbacks of the Dall Energy's boilers

<p>Fuel types covered: wet and dry biomass (wood, bark, straw, pellet, flax waste, wet willow pruning...) and fuels with high LHV Nominal power: between 2 and 20 MW Variable load operation: yes Development status: mature technology currently on the market References:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 20 MW biomass boilers « la Petite Bouverie » (Rouen, France) - 12 MW boiler at Sorø (Denmark) - 2 MW boiler for Warwick Mills (US) 	
Advantages (according to manufacturer)	Drawbacks
<ul style="list-style-type: none"> - Heat recovery from flue gas => better combustion energy efficiency (+ 25% according to manufacturer) - Flue gas cleaning by humidification + recycling of condensates - Reduction of NOx and unburnt material by vertical combustion / gasification staging (see patent WO2010022741) - Relative limited footprint 	<p>Use of additional equipment for condensing, recirculation, T ° reduction (if required) + for corrosion avoidance</p> <p>=>CAPEX & OPEX</p>

Laveur-condenseur de la société Starklab

The scrubber-condenser of the company Starklab

Ce système vise à récupérer la chaleur issue de la combustion en mettant en contact directement les fumées avec un réservoir d'eau. Ainsi, le passage des fumées dans le liquide provoque une ébullition forcée à basse température. Les bulles de gaz ainsi créées se chargent en vapeur d'eau et prélèvent de la chaleur latente au liquide qui se refroidit et remonte à la surface par poussée d'Archimède.

This system aims to recover the heat from combustion by directly putting the flue gas in touch with water. Thus, the circulation of flue gases in the liquid causes forced boiling at low temperature, and the gas bubbles thus created become charged with water vapor and extract latent heat from the liquid, which cools and rises to the surface by Archimedes' thrust.

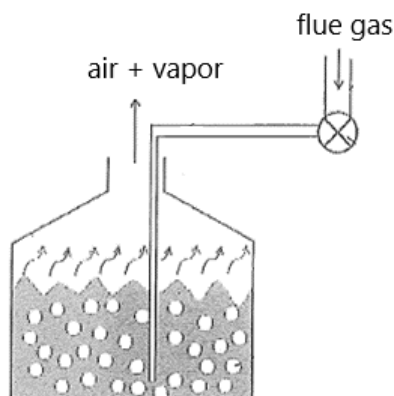


Figure 6 : Illustration du principe d'évaporation d'un liquide © Starklab
Figure 6: Illustration of the principle of evaporation of a liquid © Starklab

Les résultats des tests réalisés par le fondateur de la société permettent de démontrer la possibilité de contrôler finement la quantité de vapeur d'eau produite en fonction du débit d'air et de la pression.

The results of tests carried out by the founder of the company demonstrate the possibility of precisely controlling the amount of water vapor produced as a function of air flow and pressure.

Depuis, la société a apporté différentes améliorations à son système qui ont notamment fait l'objet d'un dépôt de brevet en décembre 2017. Une de ses particularités est la présence de différents éléments de régulation aptes à commander automatiquement les moyens d'alimentation et d'évacuation de l'enceinte d'échange, ainsi que la hauteur de liquide (cf. Figure 7).

Since then, the company has made various improvements to its system which were notably the subject of a patent filing in December 2017. One of its peculiarities is the presence of various regulation elements capable of automatically controlling the supply and evacuation of the enclosure, as well as the height of the liquid (see Figure 7).

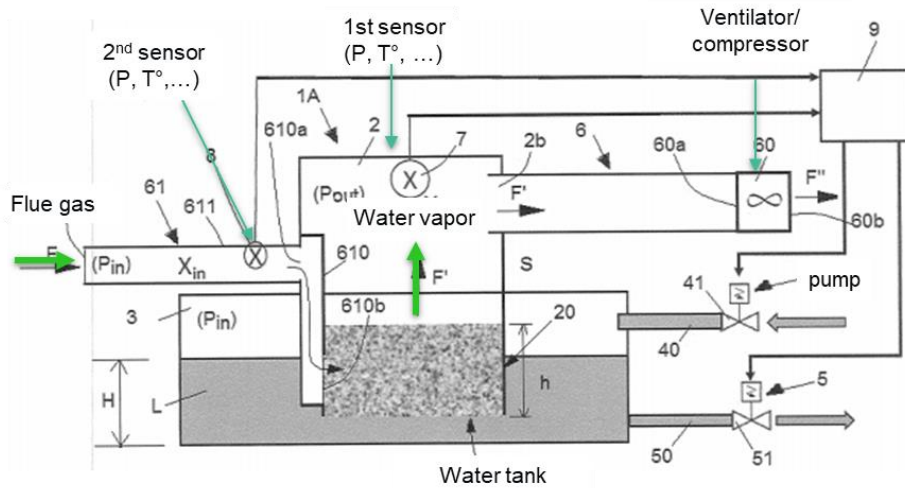


Figure 7 : Schéma de principe d'un dispositif de production et de traitement d'un flux gazeux à travers un volume de liquide contrôlé automatiquement Source : brevet WO2018146123 © Starklab
Figure 7: System for producing and processing a gas flow through an automatically controlled volume of liquid - Source: patent WO2018146123 © Starklab

Selon le fabricant, ce système permettrait de capter dans l'eau 88% des particules. Il serait d'autant plus pertinent pour le bois B car il permettrait de piéger notamment le HCl, les SOx et les NOx, et éviterait ainsi l'utilisation de procédés de réduction catalytique sélective. Du point de vue énergétique, en récupérant la chaleur des fumées, le système permettrait de réduire de 25% la puissance nominale de l'installation.

According to the manufacturer, this system would trap 88% of the particles in the water and would be particularly relevant for B type wood because it can trap HCl, SOx and NOx, and thus avoid the use of selective catalytic reduction processes. From an energy point of view, by recovering the heat from flue gases, the system would reduce the nominal power of the installation by 25%.

Il est par ailleurs à noter que le système a une faible perte de charge (1500Pa) comparée à un filtre à manches (3-4000Pa) et ne présenterait pas de risque de légionnelle car l'eau n'est pas pulvérisée et sa pression reste faible (1,5% de la pression atmosphérique). Enfin, toujours selon le fabricant, cette pulvérisation ne générerait pas de problème de moussage lorsque ce système est utilisé pour filtrer des fumées issues de chaudières biomasse.

It should also be highlighted that the system has a low pressure drop (1500Pa) compared to a bag filter (3- 4000Pa) and would not present a risk of Legionella because the water is not sprayed and because its pressure remains low (1.5% of atmospheric pressure). This spraying would not generate foaming problems when this system is used to filter flue gases from biomass boilers.

Synthèse des avantages et inconvénients des laveurs-condenseurs à contact direct

Synthesis of advantages and drawbacks of the Starklab's scrubber-condenser

Fuel types covered: solution particularly suitable for B type wood (HCl, SOx and NOx trapping) + selective catalytic reduction processes
Nominal capacity: flue gas flow between 1000 and thousands of m³/h.
Variable load operation: yes
Development status: mature technology currently on the market
CAPEX & OPEX: depending on configurations
 Nota: the elimination of selective catalytic reduction processes reduces OPEXs and the elimination of plate heat exchangers contributes to reducing CAPEX
References:

- 20 MW biomass boilers 'la Petite Bouverie' (Rouen, France) – 5.4 MW scrubber-condenser
- 3.5 MW biomass boiler 'Chemin Vert' (Boulogne-sur-Mer, France) – 300kW scrubber-condenser installed on one of the return branches of the low-temperature heating network

Nota: a 10 MW gas boiler is used in backup

Advantages (according to manufacturer)	Drawbacks
<ul style="list-style-type: none"> - Better energy transfer thanks to direct air / water contact - Plate heat exchangers removal ⇒ Decreasing of related CAPEX - Reduction of the nominal power of the installation (~25%) - Filtration avoiding/reducing the use of bag filters or electrostatic precipitators - 88% of particles trapped incl. HCl, SOx et NOx - Good compactness compared to a traditional scrubber - Low pressure drops compared to a bag filter (1500Pa) - Low risks of legionella 	<ul style="list-style-type: none"> -Need for additional equipment =>CAPEX & OPEX (including electricity for compressor & water) -Need to master bubbling for ≠ configurations

Laveur-condenseur de la société Caligo Oy

Le système Caligo CSX avec option PHP (*Parallel Heat Pump*) consiste à brancher une pompe à chaleur (PAC) en parallèle de deux zones de condensation successives se trouvant à l'intérieur d'une tour de lavage :

- Une zone inférieure à condensation « basique » ;
- Une zone supérieure boostée par l'effet de refroidissement de la Pompe à chaleur (PAC).

The scrubber-condenser of the company Caligo

The Caligo CSX system with PHP (*Parallel Heat Pump*) option consists of connecting a heat pump in parallel with two successive condensation zones located inside a washing tower :

- A lower zone with "basic" condensation;
- An upper zone boosted by the cooling effect of the Heat pump (HP).

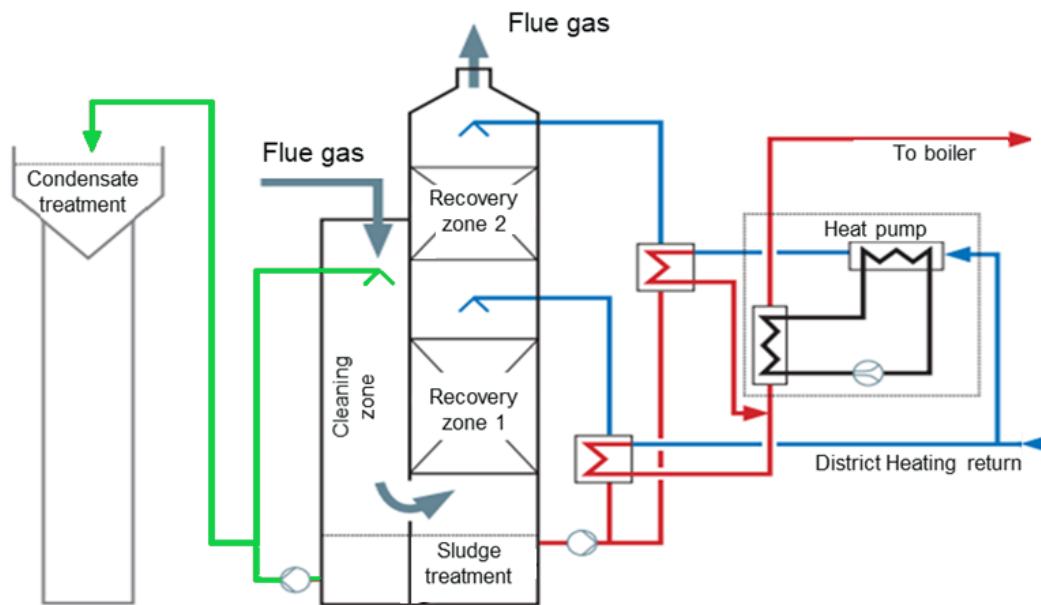


Figure 8 : Schéma du système PHP avec température de retour jusqu'à 65°C ©Caligo
Figure 8: Diagram of the CSX scrubber-condenser of Caligo with retour up to 65°C ©Caligo

Selon le constructeur, lors de la combustion de bois déchiquetée dont l'humidité absolue est de 50% (avec une température retour de 60°C), le système permettrait de récupérer plus de 20% de chaleur contre 6% avec un laveur-condenseur 'traditionnel'. Il permettrait aussi de réduire la consommation de combustible bois jusqu'à 30-35%.

According to the manufacturer, during the combustion of chipped wood having an absolute humidity of 50% (with a return temperature of 60°C), the system would recover more than 20% of heat against 6% with a 'traditional' washer-condenser. It would also reduce wood fuel consumption by up to 30-35%.

Soulignons par ailleurs que la mutualisation de la PAC a l'avantage :

- D'éviter l'investissement dans deux PAC différentes et de limiter l'empreinte au sol du système ;
- Et potentiellement d'optimiser la récupération de chaleur fatale du moteur du compresseur.

The pooling of the heat-pump many advantages:

- it avoids the investment in two different heat pumps and limit the footprint of the system;
- it eases the recovery of fatal heat from the compressor motor of the unique heat pump.

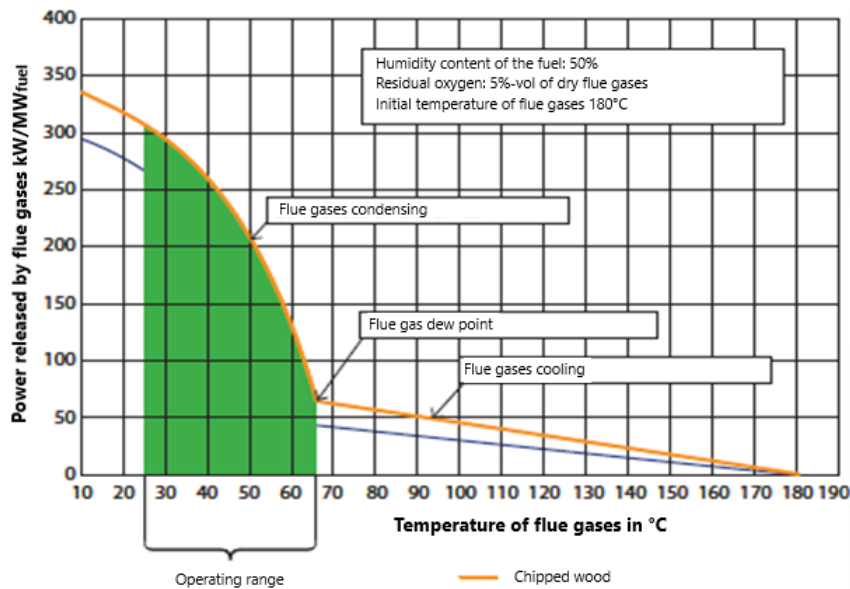


Figure 9 : Plage de fonctionnement du système Caligo avec option PHP ©Caligo
 Figure 9: Plage de fonctionnement du système Caligo avec option PHP ©Caligo

Synthèse des avantages et inconvénients du dispositif Caligo

Synthesis of advantages and drawbacks of the Caligo's scrubber-condenser

Applications: variable (hot water production, cogeneration, heat recovery...) / parallel coupling of heat pump ideal for returns < 65 °C
 Note: when return temperature is between 65 and 80 °C, a series coupling of the heat pump is recommended (SHP model)
Variable load operation: yes (depending on regulation mode & the piloting mode of the motor's pump)
Development status: mature technology currently on the market
CAPEX & OPEX: variable according to the price of the fuel (including electricity consumed by the heat pump) and to the configuration (return temperature, presence or absence of a heat accumulator, humidity content of flue gases, composition of the biomass, etc.)
Reference: 9.5 MW district heating from Joué-lès-Tours (France). According to the operator Dalkia, the scrubber-condenser could provide at least 20 % of additional capacity to the boiler

Advantages (according to manufacturer)	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Energy recovery from flue gas at ≠ levels thanks to the same heat pump - Dynamic T° regulation of the condensing circuit - Removal of most particles > 2 µm (if appropriate pre-filtering) - Charge level of the scrubber increased up to 3 to 6 times (if assisted purification function activated) - Removal of the electrostatic precipitator used for particles <2 µm - Use of NH₃ as refrigerant => good efficiency (7 <COP <9) and PRG = 0 	<ul style="list-style-type: none"> - Impacts of heat pump - Water consumption & condensate treatment before evacuation - Risk of NH₃ leakage in air, water or soil => acidification, corrosion - Risk of legionella transmission?

Pompe à Vapeur d'Eau (PAVE)

Brevetée en 1979 par la société CIEC (ex-Seccacier), la Pompe à Vapeur d'Eau (PAVE) fonctionne sur le principe de la combustion par voie humide, c'est-à-dire en ajoutant de l'eau dans la zone de combustion (cf. thèse de R. Guillet de 2002). L'ajout d'eau constitue un ballast thermique qui permet de diminuer la température adiabatique de combustion, et d'augmenter la quantité d'énergie récupérée sur les fumées en augmentant la température de rosée.

Le cycle PAVE est principalement utilisé aujourd'hui sur les chaudières à gaz à condensation, dont on va forcer en permanence le fonctionnement du condenseur à l'aide d'un système d'humidification de l'air comburant afin de maintenir un rendement de plus de 100% sur PCI tout au long de la saison de chauffe.

Une PAVE est constituée des éléments suivants :

- Une chaudière gaz équipée d'un brûleur spécifique ;
- Un condenseur ;
- Deux tours aéro-réfrigérantes (tour air + tour fumées) raccordées hydrauliquement ;
- Un ventilateur d'injection d'air sec ;
- Et des pompes de circulation.

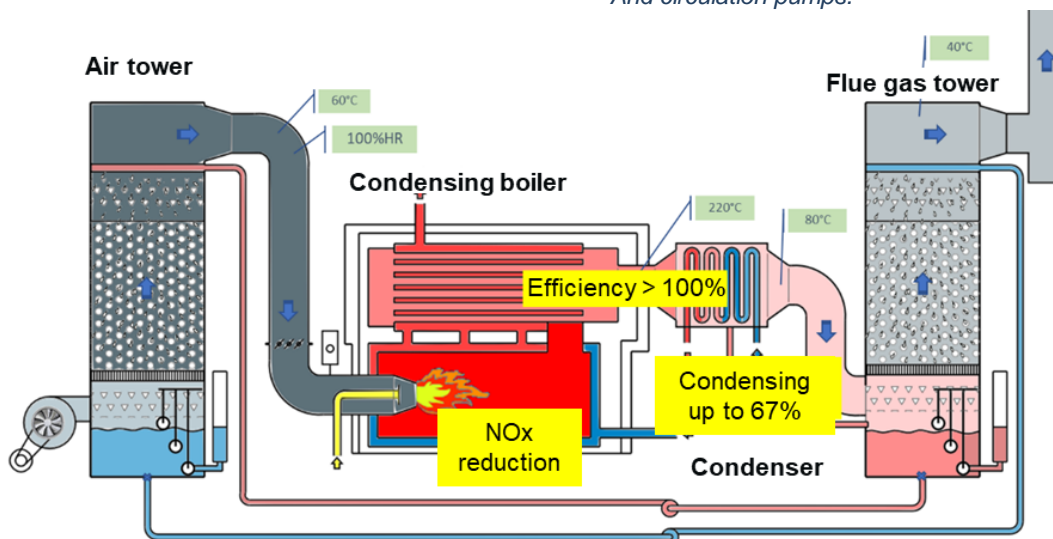


Figure 10 : Schéma de principe du cycle PAVE du gaz naturel © CIEC
Figure 10: Diagram of the WVP system sold by CIEC for natural gas combustion © CIEC

Aujourd'hui, les PAVE sont principalement commercialisées, installées et exploitées par la CIEC avec comme combustible du gaz naturel. Selon la société, une vingtaine de modèles d'une puissance allant de 1 MW à 10 MW aurait été installé depuis 2011 dont une en 2017 en Chine dans le cadre du rétrofit d'une centrale à charbon à Pékin pour Buget³.

La PAVE a fait l'objet d'un regain d'intérêt ces dernières années notamment en Chine où l'efficacité énergétique et la qualité de l'air sont des enjeux de plus en plus prégnants. Les travaux réalisés récemment par des chercheurs chinois et américains (Wang et Wei notamment) illustrent ce regain d'intérêt pour cette technologie dont les performances peuvent être intéressantes dans le cadre d'opération de rétrofit de

The water vapor pump of the French company CIEC

Patented in 1979 by the company CIEC (ex-Seccacier), the Water Vapor Pump (WVP) works thanks to the wet principle combustion by adding water in the combustion chamber. The addition of water constitutes a thermal ballast which allows the reduction of the adiabatic combustion temperature, and the increasing of the energy recovered from the flue gases by increasing the dew point temperature (see the Phd thesis of R. Guillet defended in 2002 for details).

The WVP cycle is mainly used today on gas condensing boilers, for which the condenser is forced to operate continuously using a combustion air humidification system in order to maintain an energy efficiency higher than 100% during the entire heating season.

A WVP is made up of the following components (see Figure 10):

- A gas boiler equipped with a specific burner;
- A condenser;
- Two air-cooling towers (air tower + smoke tower) hydraulically connected;
- A dry air injection fan;
- And circulation pumps.

Today, WVPs are mainly sold, installed and operated by the CIEC company for natural gas combustion. According to the company, around 20 models ranging from 1 MW to 10 MW have been installed since 2011, including one in 2017 in China as part of the retrofit plan of a coal-fired power plant in Beijing for Buget⁴.

WVP has received renewed interest in recent years, particularly in China, where energy efficiency and air quality are increasingly important issues. Recent works led by Chinese and American researchers (Wang and Wei in particular) illustrates this interest in this technology, especially for the retrofitting of existing coal boilers.

³ Beijing United Gas Engineering and Technology, joint-venture détenue à 49% par Engie et à 51% par Beijing Beiran Enterprise, fournisseur de gaz à Pékin

⁴ Beijing United Gas Engineering and Technology, joint venture hold at 49% by Engie and at 51% by Beijing Beiran Enterprise, gas supplier in Beijing

chaudières à charbon existantes. Néanmoins, à notre connaissance, ce système n'a jamais été modélisé, testé et/ou commercialisé avec de la biomasse.

However, to our knowledge, this system has never been modelled, tested and / or sold with biomass.

Synthèse des avantages et inconvénients des PAVE

Synthesis of advantages and drawbacks of the WVP system

Fuel types covered: natural gas but concept a priori transposable to biomass after adaptations (see Dall Energy's boilers based on wet flue gas condensing)
Nominal power: up to 10 MW (according to CIEC)
Variable load operation: yes, if natural gas is used (possible in case of biomass combustion if its composition and the boiler configuration are suitable)
Development status: mature technology but some optimizations are possible, particularly in terms of regulation and reduction of CAPEX
CAPEX: high but reduction can be envisaged, in particular for air-cooling towers
OPEX: variable depending on the configuration and regulation mode (return temperature, fuel used for combustion and supply to the heat pump, water treatment, etc.)
Examples of manufacturers: CIEC and Longtech
References: Beijing VPS (2 x 5,6 MW), Bourget (2.5 MW), Berthier (3 MW), Gentilly (2 MW) ...
Published performances:
 Beijing VPS: NOx ~23 mg/Nm³ / efficiency ~107% for District Heating return temperature at 50°C / CO~0
 Berthier / Gentilly VPSs: NOx ~ 20-45 mg/Nm³/ efficiency ~ 102-110%

Advantages	Drawbacks
<ul style="list-style-type: none"> -Increase in combustion energy efficiency thanks to the recovery of the latent and sensible heat of the flue gases -Reduction of NOx by spraying humid air into the flame (reduction of hot spots) -Removal of smoke plumes at the boiler room outlet -Original patent from CIEC in the public domain 	<ul style="list-style-type: none"> - Significant CAPEX & OPEX (towers, compressor, water treatment, etc.) - Complex regulation but possible optimizations Need for a sufficiently cold return which may require the use of additional equipment consuming energy (heat pump, etc.) - Water saturation requiring ventilation + dedicated anti-corrosion treatments - Significant environmental impacts a priori (water consumption & treatment, etc.) - Clutter - Risk of Legionella transmission?

Conclusion

La biomasse-énergie a connu ces dernières années un essor sans précédent qui a poussé les fabricants de chaudières et d'équipements connexes à adapter leurs produits aux demandes de leurs clients, à l'évolution des caractéristiques des combustibles et aux évolutions réglementaires.

Les principaux changements identifiés concernent la préparation amont de la biomasse (séchage, broyage, fabrication de pellets...), les modes de combustion et de régulation pour valoriser de manière optimale de larges spectres de biomasse et surtout, le développement de techniques de piégeage de polluants et de récupération de chaleur fatale notamment sur les fumées.

Néanmoins, même si des axes d'amélioration sont encore souhaitables en matière d'exploitation de certaines chaudières et infrastructures connexes (notamment en matière d'optimisation et de réduction des fuites), il paraît crucial de mettre en œuvre des pratiques vertueuses du point de vue environnemental sur l'ensemble de la chaîne de valeur (i.e. de la production et collecte des matières premières jusqu'à la distribution d'énergie jusqu'à son lieu de consommation finale) tout en tenant compte des enjeux sanitaires et alimentaires.

Conclusion

Biomass energy has experienced an unprecedented boom in recent years, pushing manufacturers of boilers and related equipment to adapt their products to customer demands, changes in fuel characteristics and to regulatory evolutions.

The main changes identified concern the upstream preparation of biomass (drying, grinding, production of pellets, etc.), combustion and regulation methods to optimize the use of large spectra of biomass and above all, the development of techniques for trapping pollutants and the recovery of fatal heat, in particular from the flue gases.

Nevertheless, even if areas for improvement are still desirable in terms of the operation of certain boilers and related infrastructures (in particular in terms of optimisation and reduction of leaks), it seems important to support virtuous practices from an environmental point of view along the entire value chain (i.e. from the production and collection of raw materials to the distribution of energy to its place of final consumption) while taking into account health and food stakes.