

Chaudières automatiques au bois et particules fines

Les chaudières automatiques permettent de réduire considérablement les émissions de la combustion du bois. (photo FD)

Pour réduire les effets des énergies fossiles sur le climat, l'une des tâches les plus importantes pour les décennies à venir est de réduire la consommation de l'énergie et de remplacer les énergies fossiles par les énergies renouvelables. Parmi celles-ci, l'énergie du bois est disponible directement sous une forme stockable et donc particulièrement appropriée pour compléter les énergies solaire et éolienne. La substitution peut se faire dans le secteur de l'électricité comme dans celui de la chaleur. En plus des applications domestiques, des chaudières automatiques au bois permettent la production de chaleur à distance dans des régions densément peuplées. Le bois étant une énergie locale qui évite les transports de longue distance et qui crée des emplois non délocalisables.

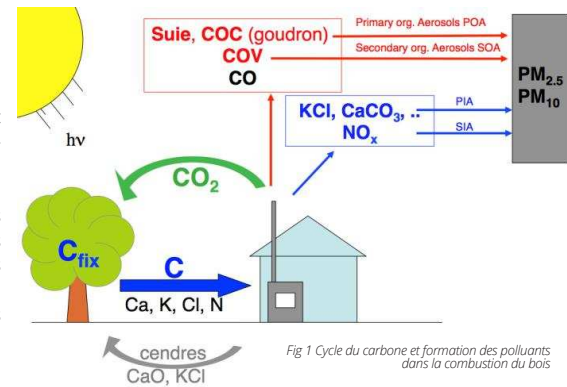


Fig 1 Cycle du carbone et formation des polluants dans la combustion du bois

Par contre, la combustion du bois est source de différentes émissions dans l'atmosphère, ce qui peut dans certains cas désavantager cette énergie. Parmi ces polluants, les particules fines (moins de 10 micromètres, PM_{10}) et les composés organiques sont identifiés comme les plus problématiques du fait de leurs effets néfastes sur la santé. Parmi les applications du bois-énergie, les installations automatiques sont de plus en plus utilisées dans une très large gamme de puissances. Cet article traite en particulier des chaudières automatiques au bois de tailles moyennes et des mesures primaires (l'optimisation de la combustion) et secondaires (l'épuration des fumées) pour minimiser leurs émissions polluantes.

Pour les chaudières à granulés de bois, la gamme de puissance va typiquement de 10 kW à plus de 500 kW. Pour les chaudières à bois déchiqueté, les puissances utilisées vont de 30 kW à plusieurs dizaines, voire centaines de MW. Par ailleurs, les installations de production combinée de chaleur et d'électricité ne sont intéressantes que dans le cas de puissances importantes et de besoins en chaleur constants (plus de 5000 heures par an) car le rendement électrique augmente et les coûts déclinent avec la puissance.

L'un des avantages des chaudières automatiques est le confort accru pour les utilisateurs. En plus, elles sont capables de réaliser une combustion de haute qualité avec un rendement important. Pour réaliser une combustion presque complète, la combustion est réalisée en deux étapes dans plusieurs zones de la chaudière. Dans une première zone, le bois est gazéifié avec de l'air primaire permettant d'ajuster la puissance. Le gaz combustible provenant du bois est ensuite mélangé avec l'air secondaire pour oxydation dans une chambre de combustion séparée et à haute température.

Les technologies les plus connues sont les chaudières à vis de poussée inférieure dénommées souvent en France « chaudières à foyer volcan » (typiquement de 30 kW à 5 MW) et les chaudières à grille mobile (typiquement de 200 kW à 100 MW). Les technologies à grilles mobiles sont plus coûteuses mais permettent l'utilisation de combustibles à haute teneur en cendres et, le cas échéant, humides. Pour les puissances supérieures à 20 MW, et jusque plus de 500 MW, la technologie de lit fluidisé est aussi utilisée. Dans les installations typiquement supérieures à 5 MW, la production combinée de chaleur et d'électricité peut être appliquée via la production de vapeur.

Grâce à une combustion presque complète, les émissions de polluants de combustion incomplète sont faibles. Comme polluants volatils, nous pouvons citer le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils (COV) (comme autres polluants : la suie et les goudrons (des substances organiques nocives sous forme liquide)). Comme le bois contient des substances minérales (Azote (N) dans les protéines et Potassium (K), Chlore (Cl), Calcium (Ca) et autres éléments dans les cendres), sa combustion produit également des polluants inorganiques. Comme polluants volatils, des oxydes d'azotes (NO_x) et comme particules, des sels tels KCl , K_2SO_4 , $CaCO_3$ et CaO sont formés.

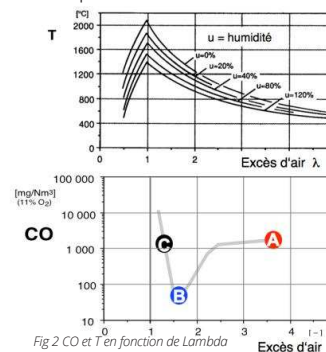


Fig 2 CO et T en fonction de Lambda

Prof. Dr. Thomas Nussbaumer de l'Université de sciences appliquées de Lucerne. Thomas Nussbaumer est un spécialiste mondialement reconnu sur les questions de combustion du bois. Il est l'un des artisans majeurs de la connaissance et de la mise en œuvre industrielle des principes de maîtrise et de régulation de cette combustion depuis les années 1990.



Inauguration de la plateforme bois-énergie de Banon dans les Alpes de Haute-Provence



Le 20 octobre 2013, a eu lieu l'inauguration de la plateforme bois-énergie de Banon sur des territoires des Alpes de Haute-Provence, créée suite à la réalisation d'un Plan d'Approvisionnement Territorial sur le Pays de Haute-Provence et le Parc Naturel Régional du Lubéron.

Labellisé pôle d'excellence rural, la plateforme dispose d'un hangar de stockage de 1 000 m², elle doit permettre à terme d'alimenter en plaquettes forestières des chaufferies du territoire à partir des forêts locales. Ce pôle financé par l'Europe, l'État et le département a été labellisé pôle d'excellence rural. La plateforme dispose d'un hangar de stockage de 1 000 m².

La gestion du pôle a été confiée à la société coopérative Provence Bio Combustible composée d'un exploitant forestier local, de SITA revalorisation spécialisée dans le recyclage des déchets et de la Scierie Guirand.

www.ofme.org



En principe, ces particules sont moins toxiques que la matière organique présente dans les goudrons, mais les sels sont néanmoins nocifs s'ils sont véhiculés dans les fumées. Ainsi, pour réduire les particules fines des chaufferies automatiques à bois, des systèmes de séparation sont nécessaires, c'est à dire des filtres à manches ou des séparateurs électrostatiques, aussi connus sous le vocable d'«électrofiltres», bien que le principe de séparation ne soit pas une filtration. Les séparateurs électrostatiques sont plus chers à l'achat mais moins coûteux à l'usage. Les filtres à manches sont quant à eux moins chers à l'achat, plus efficaces, mais plus sensibles et inappropriés pour des combustibles humides.

Enseignements :

1. Le bois contribue fortement à la production d'énergie et sa contribution peut encore être augmentée pour substituer les énergies fossiles.
2. La combustion du bois contribue à la pollution en particules primaires sous trois formes : sels, suies et aérosols organiques primaires (AOP). En plus, des aérosols organiques secondaires (AOS) apparaissent en dehors de la chaudière à partir des COV émis (Figure 1).
3. Le degré de nuisance pour la santé suit cet ordre : sels < suie < aérosols organiques (AOP et AOS)
4. Les chaudières automatiques au bois sont efficaces pour éviter les polluants nocifs (suie et substances organiques) grâce à une haute

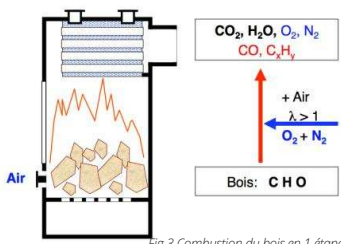


Fig 3 Combustion du bois en 1 étape

température et à une bonne qualité de combustion. Pour cela, on pratique la combustion en deux étapes qui permet un excès d'air optimal (Figure 2). Le principe de la combustion dans un système de combustion en une seule étape est illustré en Figure 3. La première amélioration apportée par les deux étapes est obtenue en évitant le refroidissement de la flamme, en améliorant le mélange entre l'air comburant et le gaz combustible, et ensuite en ajoutant une chambre de combustion à haute température (Figure 4). Par la combustion en deux étapes, les conditions pour atteindre une haute qualité de combustion sont ainsi grandement facilitées. Le principe d'une bonne combustion en chaudière manuelle avec injection de l'air forcée par des ventilateurs est présenté en figure 5. Les principes pour les chaudières automatiques sont décrits sur les figures 6 et 7. Selon le type de grille, fixe

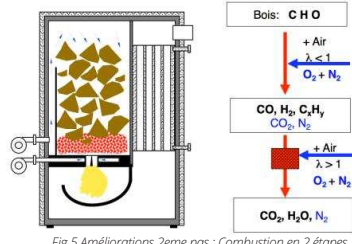


Fig 5 Améliorations 2eme pas : Combustion en 2 étapes, principe dans une chaudière manuelle

ou mobile, il est possible ou non d'utiliser du bois à teneur en l'eau élevée. Si la puissance ou l'espace pour le stockage du combustible est limité, les granulés du bois sont plus appropriés grâce à leur densité d'énergie plus importante (Figure 8). Pour les puissances plus grandes, les foyers à lit fluidisé s'imposent. La production de vapeur permet le couplage d'électricité et de chaleur, mais il faut constater que les rendements électriques sont limités et augmentent avec la puissance. La gazéification est une voie qui peut permettre des rendements électriques plus élevés par l'utilisation de moteurs ou turbine à gaz (Figure 9).

5. Comme avantage supplémentaire, des systèmes électroniques de réglage sont applicables pour les chaudières à combustion en deux étapes. Le but est de maintenir la combustion en fonctionnement optimal comme indiqué en point B sur la Figure 2.

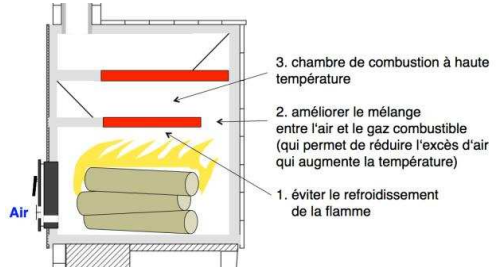


Fig 4 Mesures pour améliorer la combustion : Améliorations 1er pas

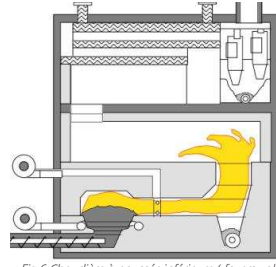


Fig 6 Chaudière à poussée inférieure («foyers-volcans») pour teneur en eau de 10% à 40% et teneur en cendres de 0% à 5%.

	Densité d'énergie		Volume de stockage
	MWh/m ³	(-)	
Plaquettes de bois	0,7 - 1	1	[Red bar]
Bûches	1,5 - 2	2	[Grey bar]
Pellets	3,2	3 - 4	[Blue bar]
Mazout	10	10	[Dark grey bar]

Fig 8 Densité d'énergie



Chaudière automatique au bois moderne, photo Schmid

6. Néanmoins, des séparateurs de poussières fines sont nécessaires pour réduire les émissions des sels qui - provenant de la combustion - sont quand-même nocifs. Pour cela, les séparateurs électrostatiques sont disponibles, et en cas de bois sec, aussi les filtres à manches. Les principes de séparation sont illustrés en Figure 10. Comme indiqué en Figure 11, les coûts spécifiques des chaufferies automatiques au bois et les coûts additionnels pour les séparateurs déclinent avec la puissance. La figure 12 montre la montée des coûts de production de chaleur en centimes par kWh valable en 2007. Les coûts pour la séparation des particules fines est raisonnable pour des systèmes de plus que 0.5 MW. Dans les dernières années, des séparateurs de moins de 0.5 MW ont été développés et leur coût a été réduit,

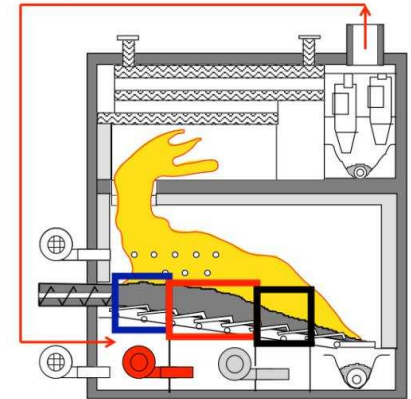


Fig 7 Chaudière à grille mobile. Exemple avec 3 zones de combustion primaires et avec recirculation des fumées

permettant l'utilisation des séparateurs pour toute la gamme de chaufferies automatique.

7. Des contaminants causent des émissions et des cendres à haute toxicité : ce sont principalement les métaux lourds (Pb, Zn, Cd, Cu...) et le chlore (qui génère des dioxines et furanes). Pour cette raison cela, les bois contaminés (bois de récupération) ne doit être utilisés que dans des chaudières de grande puissance équipées des meilleurs systèmes de séparation de particules. Les cendres de ces bois, et surtout les poussières des filtres, doivent de plus être enfouies dans des centres pour déchets toxiques.

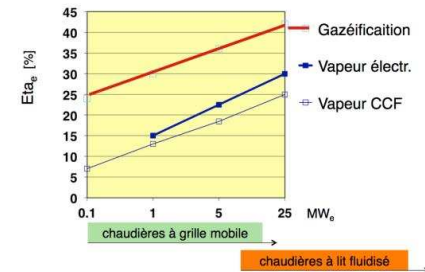


Fig 9 Rendement électrique des systèmes à turbine à vapeur (combustion) et rendement potentiel des systèmes à gazéification

Qualité de l'air : le fonds Air Bois de la vallée de l'Arve



Comme beaucoup de vallées de montagne, la vallée de l'Arve est exposée à la pollution de l'air. Sa topographie encaissée et sa météorologie, ainsi que la concentration des activités humaines favorisent l'accumulation de polluants, notamment en hiver. Face à ce problème de santé publique, un Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) initié par l'Etat a été élaboré et signé en février 2012. C'est dans ce cadre qu'a été mis en place, le Fonds Air Bois, destiné aux particuliers avec l'objectif de faciliter l'acquisition d'appareils de chauffage au bois plus performants pour, au final, améliorer la qualité de l'air, diviser par deux la facture énergétique des utilisateurs de bois et soutenir l'activité économique.

Lancée le 3 juin 2013, cette opération pilote doit permettre de moderniser le parc d'appareils de chauffage au bois individuels sur la Vallée de l'Arve. Dans cette vallée savoyarde qui compte 150 000 habitants répartis sur 41 communes, l'utilisation de chauffage traditionnel au bois-bûche est très répandue. Les appareils sont cependant pour la plupart anciens et présentent de faibles performances énergétiques et environnementales. L'objectif du

Suite page 17



Feu établi dans un foyer à grille mobile Schmid, photo FD

- Les installations de grande puissance permettent la cogénération et dans ce cas la production d'électricité est indépendante de la disponibilité en soleil ou en vent. Ceci augmente la valeur du bois.
- Remplacer des systèmes très polluants, comme les chaudières manuelles mal conduites, est une mesure efficace pour améliorer la qualité de l'air et en même temps augmenter l'efficacité de l'énergie du bois.
- Pour garantir une bonne conduite des chaudières automatiques, une grande qualité de conception des

installations est indispensable, de la part du constructeur comme du bureau d'études. Pour cela, en Suisse, en Allemagne et en Autriche, il est recommandé de mettre en œuvre une assurance qualité : « QM Chauffages au bois » (www.qmholzheizwerke.ch).

Contact :
 Prof. Dr. Thomas Nussbaumer
 Université de sciences appliquées de Lucerne, CH - 6048 Horw (Suisse) - www.hs-lu.ch
 Verenum, Langmauerstrasse 109, CH - 8006 Zurich (Suisse) - www.verenum.ch

Remerciements

- Office fédéral de l'énergie OFEN
- Office fédéral de l'environnement OFEV
- Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique FNS
- Commission pour la technologie et l'innovation CTI

Bibliographie

- Good, J. et al.: Manuel de Planification, QM Quality Management Chauffages au bois, Tome 4, Holzenergie Schweiz, C.A.R.M.E.N. e.V. Straubing 2008, Traduction 2010, Nussbaumer T.: Combustion and

Séparateurs des particules épaisses (Dépoussiérage grossier)		Séparateurs des particules fines					
1. séparateurs gravimétriques (inertia)		2. séparateurs filtrants		3. séparateurs électrostatiques (≠ filtres !)		4. laveurs humides + séparateurs gravim.	
> 50 µm	> 5 µm	> 0.01 µm		> 0.01 µm		> 1 µm	
gravitation	force centrifuge	filtre accumulant / filtration profonde dans le filtre	filtre décomaté filtration à la surface	sec	humide	à travers un liquide	gouttelette tracées
chambre de sédimentation	cyclone	filtre à particule épaisse, filtre à matière en suspension	filtres texturés par exemple filtres à manches	forme plaques ou tubes	forme tubes ou plaques	laveur de colonne avec planchers ou corps	laveur grandissement, venturi et courant radial
chargé pure							

Fig 10 Principe de séparateurs des particules fines



Chaudière industrielle et son électrofiltre, photo Christophe R.

Suite de la page 16

programme est donc de soutenir l'installation de nouveaux équipements, avec des rendements énergétiques de 75 à 80% et des émissions de substances polluantes de 10 à 50 fois moins importantes.

Le Fonds Air Bois pour la Vallée de l'Arve a été mis en place et est financé à parts égales par l'ADEME, les cinq communautés de communes, le Conseil général de Haute-Savoie et le Conseil régional Rhône-Alpes, pour une enveloppe globale de 3,2 millions d'euros sur quatre ans (800 000 euros par an). Il est destiné à soutenir le financement d'appareils de nouvelle génération grâce à une prime de 1 000 euros accordée uniquement pour les équipements labellisés Flamme Verte 2 étoiles ou équivalent, et dont les émissions de poussières sont inférieures à 50 mg/Nm³.

En septembre 2013, près de 200 dossiers avaient déjà été déposés. Les demandes devraient aller croissantes à l'approche de l'hiver, d'autant que ce programme bénéficie d'une campagne de promotion dans les communes, à la radio, à la télévision et auprès des installateurs, qui en sont les ambassadeurs.

Co-combustion de Biomass. Energy & Fuels, 2003, 17(6), 1510-1521

Nussbaumer, T.: Régulation des chaudières automatiques, Bois-énergie 3 1999, 44 - 51

Nussbaumer, T.: Techno-economic assessment of particle removal in automatic wood combustion plants, 15th European Biomass Conference, 2007, Berlin 7-11 May 2007, OE2.5, 2362-2365

Nussbaumer, T.: Energie-bois - Partie 1: Introduction et notions fondamentales, Schweizer Baudokumentation, Artikel 00500, Blauen, Oktober 2007, 12 p.

Nussbaumer, T.: Energie-bois - Partie 2: Installations de chauffage au bois à alimentation manuelle, Schweizer Baudokumentation, Artikel 00510, Blauen, Februar 2008, 16 p.

Nussbaumer, T.: Energie-bois - Partie 3: Installations de chauffage à granulés/pellets de bois, Schweizer Baudokumentation, Artikel 00520, Blauen, Mai 2008, 16 p.

Nussbaumer, T.: Energie-bois - Partie 4: Installations automatiques de chauffage au bois,

Schweizer Baudokumentation, Artikel 00530, Blauen, Mai 2008, 16 p.

Nussbaumer, T.: Emissions particulières lors de la combustion du bois: Influence du type de combustion sur les particules et leur toxicité, Bioénergie International 20 2012, 8-13

Nussbaumer, T.: Technologies des chaufferies automatiques au bois et aspects environnementaux dans la recherche pour réduire des polluants et précipiter des poussières fines, colloque bois-énergie collectif et industriel, Comité Interprofessionnel du Bois-Energie (CIBE), 10.10.2013, Dijon (F).

Valide - pour des conditions de réalisation normales et une planification optimale pour 2000 h/a
 - en Suisse en 2007
 - les coûts des chaudières sont pareilles
 - à 2013 des séparateurs électrostatiques < 1MW sont disponibles aux coûts de -30%

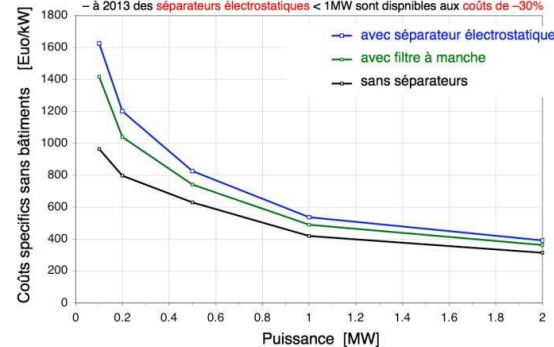


Fig 11 Coût d'investissements spécifiques des chaudières automatiques au bois sans séparateurs, avec des filtres à manches et avec des séparateurs électrostatiques

Coûts de production de chaleur 2007

Intérêt 5% p.a. pour 15 ans
 Opération à 2000 h/a
 Prix du bois: 3 Ct./kWh
 Prix du mazout: 6 Ct./kWh (= € 60.-/100 l)
 2013
 +50% = 5 Ct./kWh
 +50% = 9 Ct./kWh

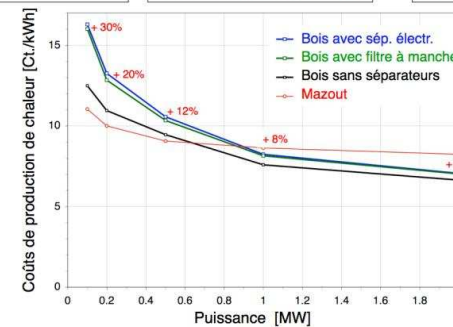


Fig 12 Coût de production de chaleur, dates typique en Cents par kWh et valid par exemple en Allemagne en 2007. Les coûts pour les combustibles en France 2013 sont typiquement 50% plus hauts et les coûts des séparateurs sont déclinés, alors la chaleur des chaudières au bois avec des séparateurs est devenu plus intéressant.