
CHAUFFERIE AUTOMATIQUE AU BOIS - ROCHEFORT / NE

Données techniques d'exploitation

2005 - 2006

JUIN 2006

Document établi par Jérémy Dupuy, stagiaire de l'université Paul Sabatier à Tarbes chez B.Matthey S.A.

Destinataires : **Commune de Rochefort
PowerCondens
Energie Bois Suisse
Service cantonal de l'énergie
Bureau Matthey**

Auteur du document
Bernard Matthey
Ingénieurs-Conseils SA
La Grande-Fin 19
2037 Montezillon

SOMMAIRE

Publication pour la revue "Energies renouvelables"	page 3
Tableaux des mesures	page 5
Note de stage	page 6
Figures	page 15
Annexes	page 16
Tableau des données techniques de l'installation de Rochefort	
Publication 1	
Fiche AJENA	
Fiche de pollution ANIME	

UN CONDENSEUR SUR UNE CHAUDIERE A PLAQUETTES FORESTIERES DE 400 KW

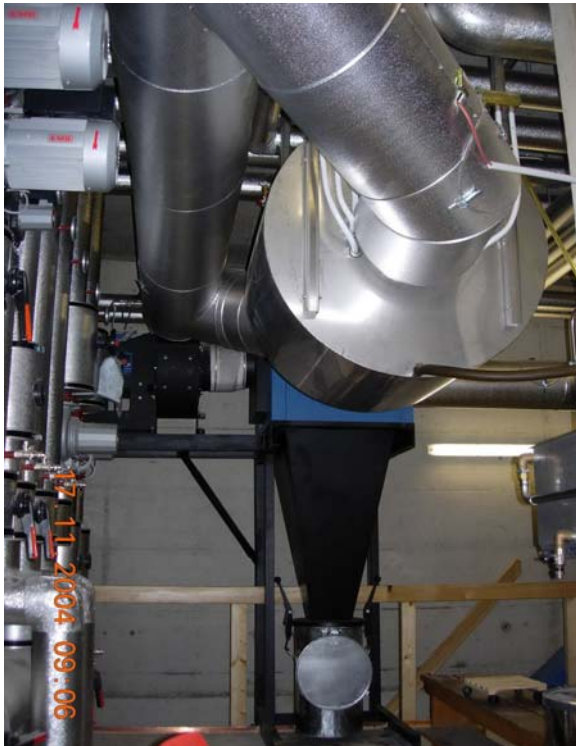
Des résultats très très encourageants

Jérémy Dupuy ¹⁾

La condensation des gaz de fumées pour en récupérer la chaleur latente est un principe appliqué maintenant systématiquement au gaz naturel, trop peu souvent au mazout et pratiquement jamais au bois.

CHAUDIERE ET CONDENSEUR

Mise en service en automne 2004, l'installation de Rochefort comprend une chaudière de 400 kW et un condenseur 50 kW placé en série sur le conduit de fumées, après le filtre cyclone. Le condenseur est constitué d'un "enchevêtrement de tubes inox" protégés par du polyéthylène réticulé, placés dans une cuve cylindrique. Un by-pass, très rarement utilisé, permet de déconnecter manuellement le condenseur au moment de son dégrassage au jet (30 minutes, environ une fois par mois).



Un système de lavage automatique fonctionnant 15 minutes par jour à partir d'eau prélevée dans le bac

des condensats complète l'équipement. Les condensats (débit 5 à 30 litres/heure) sont évacués sans traitement préalable dans les eaux usées.

Le circuit hydraulique du condenseur est raccordé sur le retour du circuit de chauffage à distance, qu'il réchauffe de quelques degrés.

A la sortie du condenseur, la température des fumées n'est plus que de quelques degrés supérieure à la température du retour du chauffage à distance.

Pratiquement, le refroidissement des fumées jusqu'à saturation entraîne la formation d'un panache à la sortie de la cheminée, panache visible toute l'année, mais plutôt bien perçu et apprécié par les voisins qui constatent que "leur chaudière" fonctionne.

QUELQUES RESULTATS

Après une année de fonctionnement, le condenseur avait produit 9.8 % de la chaleur de la chaudière, les valeurs hebdomadaires moyennes oscillant entre 6.7% et 16.1%. En effet, la production du condenseur augmente avec la température des fumées en sortie de chaudière et avec l'humidité du bois. En revanche, elle diminue lorsque la température de retour du chauffage s'élève. La figure 1 exprime cette relation. Le condenseur sera donc d'autant plus efficace que le bois est humide et que les températures de retour sont basses, ce qui a été vérifié en brûlant un lot de hêtre abattu sous la neige, déchiqueté et brûlé le jour même. La part du condenseur atteignait alors 14 %.

Le surcoût généré par la fourniture, la pose et les équipements liés au condenseur a été de Fr. 30'000.-, dont à déduire Fr 6'000.- économisés par l'achat d'une chaudière moins puissante. A l'économie de combustible réalisée (~ Fr. 5'500.-/an) s'ajoute l'abaissement du prix de revient du bois déchiqueté par l'absence de stockage intermédiaire. Le condenseur sera amorti en 3 à 4 ans.

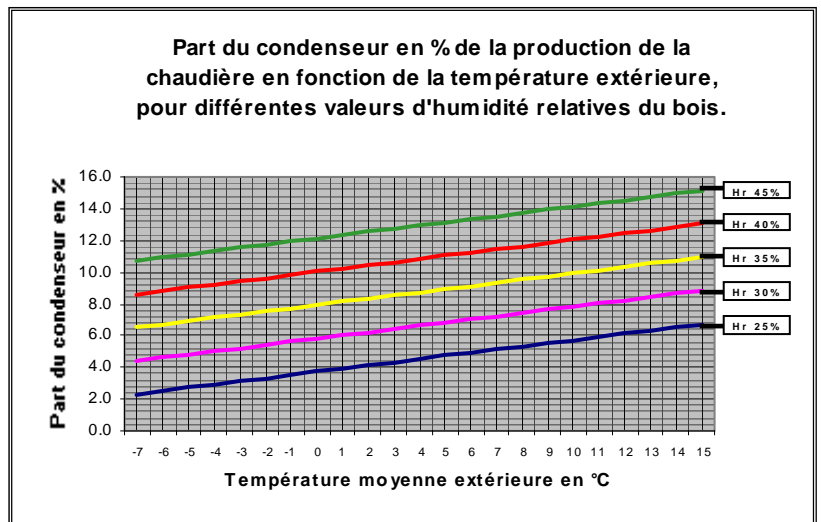
LES RESULTATS D'EXPLOITATION

Puissance de la chaudière à bois (Müller) :	400 kW
Puissance du condenseur Powercondens :	40 - 50 kW
Production de chaleur chaudière (01/05 à 01/06) :	1'364'000 kWh/an
Production de chaleur-condenseur (01/05 à 01/06) :	133'600 kWh/an
Part du récupérateur-condenseur :	9.8%
Consommation de plaquettes forestières :	1680m ³ /an
Humidité relative des plaquettes :	25 à 50%
Energie produite par les plaquettes : (chaudière + condenseur) (Résineux et feuillus de 1 à 2 ans, pris en forêt)	890 kWh/m ³
Longueur du réseau (22 clients) :	1'140m
Température de départ sur le réseau :	65 - 75°C
Température moyenne de retour sur le réseau :	38 - 48°C
Débit moyen de condensat :	8 l/h
Investissements (chaufferie + réseau) :	Fr. 1'700'000
Surcoût dû au condenseur: (y compris raccords hydrauliques et régulation)	Fr. 30'000

LA CONDENSATION DOIT DEVENIR LA REGLE

Les bons résultats de Rochefort prouvent que l'on peut et que l'on doit améliorer l'efficacité des chaudières à bois. Avec la condensation c'est comme si l'on augmentait d'un coup de 10 % la surface des forêts suisses et que l'on abaissait en même temps de 20 % le prix du bois. Il est urgent que les fabricants proposent un récupérateur-condenseur pour toutes les chaudières.

1) Ingénieur Thermicien. Université Paul Sabatier Toulouse. Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils SA - 2037 Montezillon



CHAUFFERIE AUTOMATIQUE AU BOIS - ROCHEFORT

Mesures 2005 - 2006

TABLEAUX

BILAN SUR LE CONDENSEUR DE LA CHAUFFERIE DE ROCHEFORT

Note de stage

Juin 2006

Objectifs

- Connaître le niveau d'efficacité du condenseur.
- Etablir les conditions de fonctionnement optimum.
- Proposer une amélioration.
- Faire le bilan des économies réalisables.

Auteur du document

Jérémy Dupuy
Stagiaire Université Paul Sabatier Toulouse
Bureau Bernard Matthey
Ingénieurs-Conseils S.A.
CH -2037 Montezillon

Analyse et hypothèses

CONSTAT VISUEL

Un panache blanc épais est visible à la sortie du conduit de fumée. Ce panache indique que l'air contenu dans les fumées est saturé de vapeur d'eau. Outre les résidus "conventionnels" (C_{O_2} , C_{CO} , NO_x , SO_2 , imbrûlés et cendres) les gaz de fumées contiennent donc de l'air qui est constitué de vapeur d'eau et de gouttelettes d'eau. L'eau contenue dans le combustible n'est pas valorisée à 100 % dans le condenseur.

Hypothèse sur le panache :

La vapeur d'eau peut se recondenser en gouttes (d'un diamètre moyen de 5 μm), il est possible d'améliorer le rendement du condenseur en valorisant ces gouttelettes.

BILAN SUR L'AIR COMBURANT

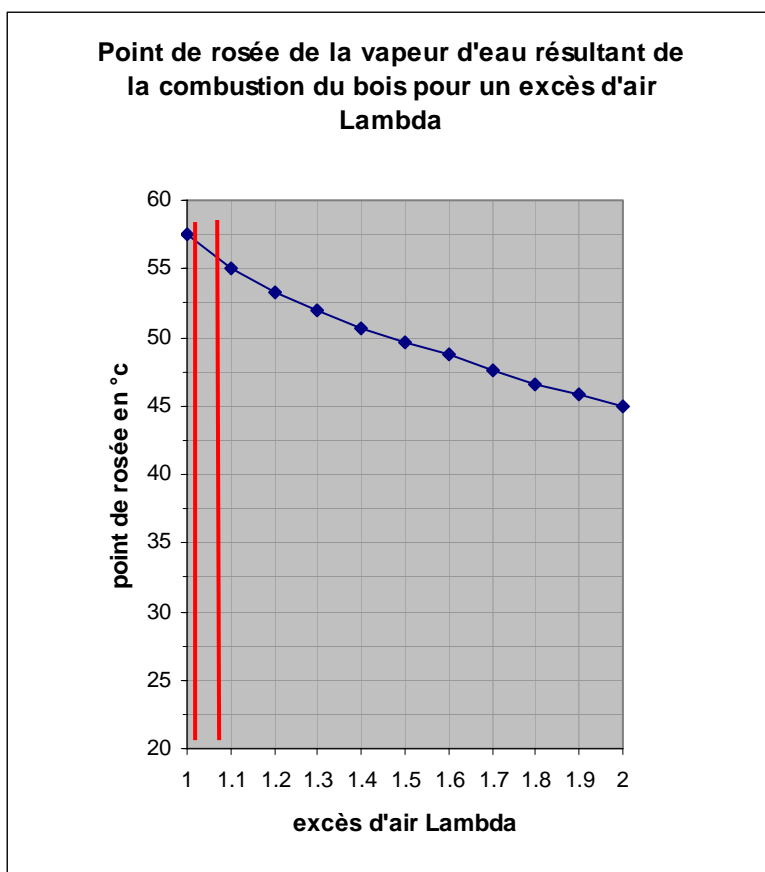
Les données ANIME indiquent une consommation d'air comburant d'environ 1kgair/kgbois. La chaudière a un réglage tel qu'elle fonctionne avec un excès d'air d'environ 10% (variation de 8% à 12% en fonction de l'analyse des fumées faite par la sonde Lambda). L'excès d'air a une influence non négligeable sur la température de rosée. Plus la combustion est réalisée sous excès d'air et plus la température de rosée sera basse.

Tout air en excès cause une perte car, pour le porter à la température des gaz de cheminée évacués, on consomme de l'énergie. En pratique, le mélange d'air et de combustible n'est jamais parfait, et il faut maintenir un certain excès d'air pour assurer une combustion complète. Toutefois, plus cet excès est faible sans perte de rendement de combustion, meilleur est le rendement de l'appareil.

Conclusion sur l'air comburant :

En diminuant l'excès d'air, on élève le point de rosée et on améliore le rendement du condenseur.

Graphe 1



BILAN DES EMISSIONS DE LA CHAUDIERE BOIS

Selon l'étude réalisée par ANIME, les émissions d'une chaudière bois avec condenseur, au plus défavorable en terme de pollution sont telles que :

Comburant + carburant	EMISSIONS						
	CO ₂	CO	NO _x	H ₂ O	SO ₂	Cx Hy (Hydrocarbures imbrûlés)	Résidus solides (Cendres)
Bois + Air							
1000 kWh de chaleur utile	595 kg	1.3 kg	428 g	175 kg	33 g	4.9 g	1.5 kg

La combustion moyenne du bois provoque un dégagement de CO₂ (environ 2X plus que le mazout), de CO (environ 13X plus que le mazout), de NO_x (environ 3X plus que le mazout), de H₂O (environ 2X plus que le mazout) et de résidus solides (environ 350X plus que le mazout). En revanche la combustion du bois engendre peu de rejets de SO₂ (10 à 15X moins que le mazout) et d'hydrocarbures imbrûlés (environ 10X moins que le mazout). Le bois est un combustible propre, car il rejette très peu de composants toxiques. Les rejets de CO₂ sont plus importants que pour du fioul, mais font partie du cycle du CO₂ (le bois rejette autant de CO₂ pendant sa combustion qu'il en a absorbé durant sa croissance) alors que le CO₂ rejeté par le fioul a été emmagasiné il y a des millions d'années, ce qui crée un déséquilibre dans le cycle du CO₂.

On sait que le taux de CO₂ influence directement la température du point de rosée dans le condenseur : plus il y a de CO₂ dans les fumées et plus la température de rosée sera élevée. En pratique, si on souhaite récupérer la chaleur de condensation, il est donc judicieux d'avoir une teneur en CO₂ plus élevée pour démarrer la condensation le plus tôt possible.

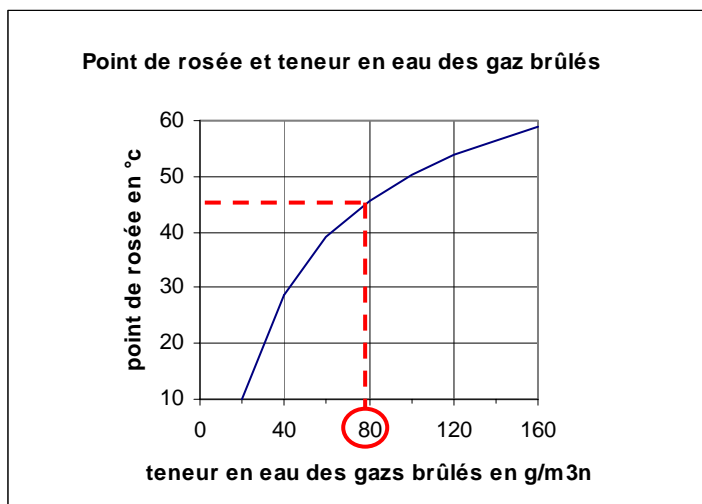
Conclusion sur le bilan des émissions de la chaudière :

Le taux élevé de CO₂ dans les fumées provoque une augmentation de la température du point de rosée, facilite la condensation de la vapeur d'eau contenue dans les fumées et permet de mieux valoriser cette chaleur. Il est donc possible de gagner en efficacité en jouant sur les paramètres de combustion.

LES CARACTERISTIQUES DU BOIS DE COMBUSTION

Graphe 2

Le condenseur exploite la chaleur latente de condensation de l'eau. Plus le bois est humide, plus le potentiel de récupération de chaleur au condenseur sera important. Mais attention, **si l'on veut valoriser cette chaleur latente de condensation**, il faut impérativement que la **température d'eau de retour soit inférieure ou égale à la température de condensation** des gaz de fumées. Or la température de rosée évolue selon cette courbe. (Recknagel)



En traitillé : valeur moyenne (bois à 40% d'humidité relative) correspondant au fonctionnement à Rochefort.

Conclusion sur la teneur en eau des fumées de combustion :

Le taux élevé de vapeur d'eau dans les fumées provoque une élévation de la température de rosée. Le rendement du condenseur augmente donc avec la teneur en eau des gaz de fumée.

Etudes des variations de performances du condenseur-récupérateur

LES EMISSIONS DANS LES FUMÉES

Tableau 1 : Emissions provoquées pour produire de 1'000 kWh de chaleur utile.

	CO ₂ [kg]	CO [g]	NO _x [g]	H ₂ O [kg]
Plaquettes à 50% (Humidité relative)				
Résineux	581	2017	645	221
Feuillus	651	2259	723	247
Plaquettes à 35% (Humidité relative)	700	1548	504	206
Equivalence				
	275 g/m³	0.6 g/m³	0.2 g/m³	81 g/m³

Bilan pour 1'000kWh de chaleur produite (Vol.fumée = 7.9 m³/kg_{bois} et PCI = 3.1 kWh/kg)

1'000 kWh ⇔ 322 kg de bois

322 kg de bois brûlés ⇔ 2'543 m³ de fumée

On produit : 700 kg de CO₂ et 206.5 kg d'eau pour la production de 1'000 kWh de chaleur donc :

700 kg CO₂ ⇔ 275 g/m³n

206.5 kg H₂O ⇔ 81 g/m³n

Si on applique cette teneur moyenne en eau dans le graphe 2, on trouve une température de rosée de la vapeur d'eau d'environ **47 °C**. Pour condenser la vapeur d'eau contenue dans les fumées, il faut avoir des retours inférieurs à cette température. On constate que le feuillu est plus riche en eau, donc peut permettre d'élever la température de rosée.

COMPARATIF THEORIQUE ENTRE DU HETRE A 40 % ET DU SAPIN A 20 %

Plaquettes hêtre à 40 % d'humidité

Hêtre : 600 kg/m^3 apparent bûche
1 stère = 1.8 m^3 plaquettes

Masse volumique
= $667/1.8 = 333 \text{ kg/m}^3$ plaquettes

Contenu énergétique massique
= 2.734 kWh/kg

Contenu énergétique pour 1 m^3 de
plaquettes de hêtre à 40% Hr.
= $2.734 \times 333 = 911 \text{ kWh/m}^3$ plaquettes

Plaquettes sapin à 20 % d'humidité

Sapin : 375 kg/m^3 apparent bûche
1 stère = 1.8 m^3 plaquettes

Masse volumique
= $375/1.8 = 208 \text{ kg/m}^3$ plaquettes

Contenu énergétique massique
= 4.132 kWh/kg

Contenu énergétique pour 1 m^3 de
plaquettes de sapin à 20% Hr.
= $4.132 \times 208 = 860 \text{ kWh/m}^3$ plaquettes

Les valeurs ci dessus sont théoriques et il existe des incertitudes quand au rapport poids / volume que nous considérons pour les calculs, tel que $1 \text{ stère} = 1.8 \text{ m}^3$ de plaquettes. En étudiant les relevés de mesures, on peut établir une moyenne réelle suivante :

Contenu énergétique pour 1 m^3 de plaquettes de hêtre
= $1.82 \times 534 = 900 \text{ kWh (PCI)}$

Contenu énergétique pour 1 m^3 de plaquettes de sapin
= $3.42 \times 300 = 800 \text{ kWh (PCI)}$

Propositions d'améliorations du rendement

UN CHOIX JUDICIEUX DU BOIS

Si on considère que la chaufferie produit 1'200 MWh/an, au rendement près alors, l'économie potentielle réalisable en utilisant du hêtre humide comme combustible est telle que :

Consommation de hêtre = $1.200.000/900 = 1'333 \text{ m}^3/\text{an}$

Consommation de résineux = $1.200.000/800 = 1'500 \text{ m}^3/\text{an}$

Economie de bois = $1500-1333 = 170 \text{ m}^3/\text{an}$

Il faut dire que le prix des plaquettes de hêtre est plus élevé que celui des plaquettes de résineux.

MODIFICATION DU REGLAGE D'EXCES D'AIR

En modifiant le réglage d'excès d'air à **5%** plutôt, que **10%** actuel, la température de rosée au condenseur va augmenter de **5°C** et va donc passer de **53°C** à **58°C** (calculs théoriques tirés du Recknagel, en réalité il y a d'autres paramètres qui influencent la température de rosée, tels que le taux de CO₂, la dépression dans le condenseur, le taux de particules et d'imbrûlés...D'après les mesures, la température de rosée va plutôt passer de 51 à 54°, d'où une augmentation de **3°C**).

Si on considère que le combustible est du hêtre à 40% d'humidité, que l'excès d'air est de 5%, que la température d'eau de retour au condenseur est inférieure à la température de rosée et que la chaudière fonctionne pendant 2'200h/an, alors l'économie potentielle réalisable sera telle que :

$E_{\text{économisée}} = (\text{Débit masse eau}) \times (\text{Cp.eau}) \times (\text{DT}) \times (\text{nb heures})$

$E_{\text{économisée}} = 11'500 \times 4.18 \times 3 \times 2'200$

soit = 317'262 MJ/an

soit = $317'262 \times 0.278 = \mathbf{88'200 \text{ kWh/an}}$

Economie = $88'200 \times 3.5 = \mathbf{3'090 \text{ Fr./an}}$

PRECHAUFFAGE DE L'AIR COMBURANT EN PARTIE HAUTE DE LA CHAUFFERIE

Si on considère la température moyenne actuelle de l'air comburant à 15°C, la température moyenne de l'air au plafond à 35°C, la masse moyenne d'un m³ de plaquettes à 320 kg et le débit d'air à 8m³/kg_{bois} alors en prélevant l'air comburant au plafond de la chaufferie on obtient un gain de :

$E_{\text{économisée}} = (\text{Déb.vol air}) \times (\text{vol.bois}) \times (\text{mv.bois}) \times (\text{Cp Air}) \times (\text{mv air}) \times (\text{DT})$

$E_{\text{économisée}} = 8 \times 1'300 \times 320 \times 1 \times 1.12 \times 20$

soit = 74'747.2 MJ/an

soit = $74'747.2 \times 0.278 = \mathbf{20'724 \text{ kWh/an}}$

Economie = $20'724 \times 3.5 = \mathbf{725 \text{ Fr./an}}$

Bilan des économies réalisables

Excès d'air à 5% au lieu de 10%	Préchauffage de l'air comburant	TOTAL
88'200 kWh/an	20'724 kWh/an	108'924 kWh/an
3'090 Fr./an	725 Fr./an	3'815 Fr./an

Soit l'équivalent de 10'000 L de mazout par an.

RECOMMANDATIONS TECHNIQUES :

- **Diminuer les températures de retour**
- **Diminuer le réglage d'excès d'air**

Préchauffer l'air comburant en partie haute de la chaufferie

CHAUFFERIE AUTOMATIQUE AU BOIS - ROCHEFORT

Mesures 2005 - 2006

FIGURES

Auteur du document
Bernard Matthey
Ingénieurs-Conseils SA
2205 Montezillon

CHAUFFERIE AUTOMATIQUE AU BOIS - ROCHEFORT

Fiches techniques

ANNEXES

