Le BOIS INTERNATIONAL
L'officiel du bois >> Scierie / Exploitation forestière

59e Cahier du bois-énergie

Supplément au N° 16
3,50 euros
samedi 27 avril 2013

Installations bois-énergie
Optimiser le dimensionnement et l'exploitation p.4

Chaufferies bois
Les paramètres qui influent sur les performances énergétiques p.11

Réseaux de chaleur
le temps de l'efficience p.15

Chaudière bois de Cherbourg (Manche) - 7,6 MW – Photo Biomasse Normandie

Optimisation de l'efficacité énergétique des installations bois-énergie collectives et industrielles

nidal

LE DECHIQUETAGE A PLAQUETTES POUR LES PROFESSIONNELS

D'origine autrichienne, nos machines sont robustes, fiables et sécurisées. Depuis 1984, nous importons pour vous cette grande marque qui domine le marché européen du broyage depuis 45 ans. La granulométrie produite, de grande qualité et régularité est de type G30 à G100 pour les chaudières particulières, communales et industrielles.

Eschlböck BIBER

Biber 80: Ø adm. 55cm, largeur d'alimentation 98cm, tambour de 14 couteaux, prise de force 176 à 367CV, ou camion de 539CV.

Biber 83/84: Ø adm. 60cm, largeur d'alimentation 98/122cm, tambour de 8/16 ou 10/20 couteaux, prise de force 204CV, ou camion de 539CV.

Biber 92: Ø adm. 75cm, largeur d'alimentation 122cm, tambour 10/20 couteaux, prise de force 204CV, ou camion de 539CV.

NIDAL - 2, rue Vauban - ZI n°2 - 68170 RIXHEIM
Tél : 0389.318.585 - Fax: 0389.318.580 - www.nidal.fr - info@nidal.fr

COGEBIO

Industries, collectivités...
Réduisez votre dépendance aux énergies fossiles !

Brûleur biomasse hybride GASCLEAN

En remplacement des brûleurs fioul, gaz naturel, propane • pour chaudière, four ou séchoir • valorisation de déchets végétaux : bois déchiqueté, sous-produits agricoles, granulés... • sans modification du procédé • gamme de 50 à 2000 kW • rendement supérieur à 90% • faibles rejets atmosphériques • éligible aux CEE et au Fonds Chaleur.

Mail : info@cogebio.com - Tél : 04 37 44 20 03 - www.cogebio.com

froling

LA NOUVELLE GENERATION DE CHAUDIERES FROLING.

- Chaudières à bois déchiqueté copeaux et granulés (7 à 2000 kW)

PLUS X AWARD
honored as:
BEST PRODUCT OF THE YEAR 2012

pour:
S4 Turbo (F)
SP Dual
P4 Pellet
T4

Froling SARL I 1, rue Kellermann I F-67450 Mundolsheim I Tél. 03 88 193 269 I Fax 03 88 193 260 I www.froling.fr I froling@froeling.com

Optimisation de l'efficacité énergétique des installations bois-énergie collectives et industrielles

Sommaire

- Le bon dimensionnement et l'exploitation optimisée d'une installation bois-énergie sont garants de sa performance énergétique p.4
- Performances énergétiques des chaufferies bois : paramètres influents et pistes d'optimisation p.11
- Réseaux de chaleur : le temps de l'efficience p.15

Les Cahiers du bois-énergie, co-édités par Biomasse Normandie et le Comité interprofessionnel du bois-énergie (CIBE), sont publiés avec le soutien de l'Ademe (direction productions et énergies durables - service bioressources) et du Bois International, sous la responsabilité éditoriale de Biomasse Normandie.
Ce cahier a été préparé par Paul ANTOINE, Bruno CLAIROUIN, Marie-France CLAVE, Stéphane COUSIN et Mathieu FLEURY (Biomasse Normandie) et Serge DEFAYE (CIBE).
Nous remercions les membres de la commission "Retour d'expériences de conception, construction et exploitation" du CIBE et tout particulièrement Jean-Pierre TACHET (CIBE, secrétaire / animateur de cette commission) pour leur contribution. Mise en page par la rédaction du Bois International.

Vers l'excellence énergétique

Le second principe de la thermodynamique, celui de la dégradation de l'énergie, postule que les échanges "du chaud vers le froid" ne s'opèrent pas à l'identique, mais toujours avec des pertes. Aussi, les énergéticiens ont-ils le souci constant de traquer ces pertes pour atteindre des rendements (rapports entre énergie sortante et entrante) les plus élevés possible.

Un rendement global maximum, produit de bons rendements de combustion, de distribution, d'émission… est recherché pour trois raisons :

- énergétique, en ne gaspillant pas, autrement dit en ne dissipant pas dans l'atmosphère ou le sol une forte partie de l'énergie contenue dans le combustible, fût-il renouvelable ;
- environnemental, puisque "l'énergie qui pollue le moins est celle qu'on ne consomme pas" ;
- économique enfin, car à besoins à satisfaire constants, le coût du MWh pour l'usager est évidemment plus faible si le rendement global est élevé, la consommation de combustible étant moindre.

Le présent dossier liste des solutions, souvent difficiles à mettre en œuvre, qui permettent d'aller vers une filière bois-énergie de plus en plus efficace et vertueuse.

Le bois-énergie a globalement plutôt bonne presse et bénéficie d'un consensus relatif chez les décideurs et dans l'opinion publique.

Les professionnels ne doivent pas camper sur ce constat, mais démontrer que les systèmes et les équipements d'aujourd'hui et de demain sont toujours plus performants. Comme nous avons déjà eu l'occasion de le dire, la perfection n'est pas de ce monde, mais rien n'interdit d'essayer de l'approcher.

Serge DEFAYE
DEBAT
Vice-président du CIBE

Le bon dimensionnement et l'exploitation optimisée d'une installation bois-énergie sont garants de sa performance énergétique

Lorsqu'une installation bois-énergie est envisagée en milieu industriel ou pour le secteur de l'habitat / tertiaire, en chaufferie dédiée ou sur réseau de chaleur, l'objectif premier est de satisfaire les besoins thermiques du ou des usagers. Il est donc impératif de **dimensionner l'installation de telle sorte qu'elle soit en mesure de délivrer la puissance maximale nécessaire** pour le process, le chauffage des locaux et/ou l'eau chaude sanitaire (ECS), **tant au stade de la production d'énergie qu'à celui de sa distribution, tout en veillant à optimiser les performances économique et énergétique de l'ensemble**.

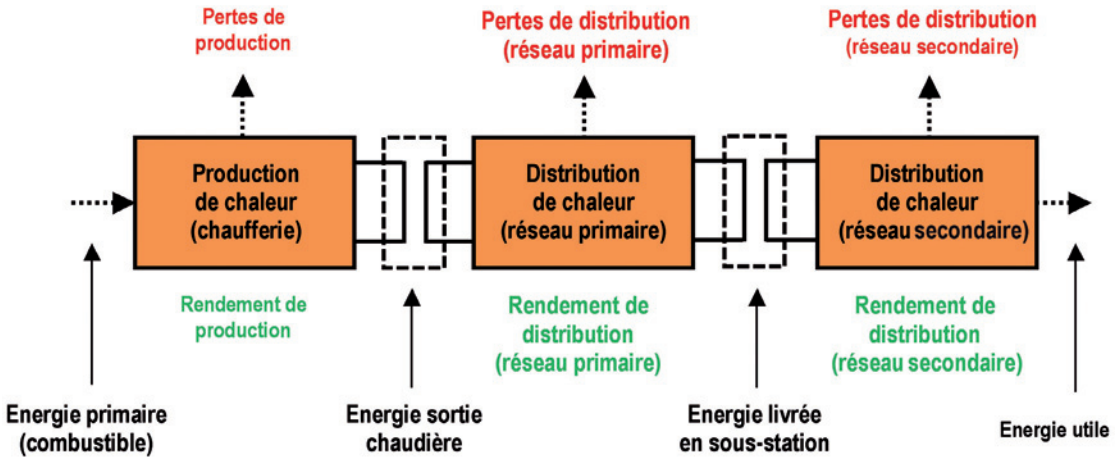
Une chaudière bois fonctionnant à pleine puissance

Dans la phase de production, l'objectif est de **couvrir le maximum de besoins par le bois tout en minimisant la puissance de la (des) chaudière(s) bois** afin de limiter l'investissement et de favoriser un fonctionnement le plus souvent possible à pleine puissance, sans à-coup brutal et systématiquement au-dessus du minimum technique du (des) générateur(s).

Mono-énergie / bi-énergie

En matière de bois-énergie, deux options sont envisageables : la mono-énergie ou la bi-énergie.

Dans le premier cas, la chaudière bois doit pouvoir assurer à elle seule la totalité de la production de chaleur nécessaire. Cette solution est intéressante pour une entreprise dont les besoins de process sont relativement constants dans le temps, beaucoup moins pour une installation



Pertes et rendements de production / distribution. *(source Biomasse Normandie)*

collective pour laquelle il faut tenir compte des jours exceptionnellement froids : la chaudière doit alors avoir une puissance élevée et fonctionne sur une partie de la demi-saison à un taux de charge inférieur au minimum recommandé par le constructeur (généralement 15 à 25%), induisant une combustion incomplète et une dégradation des performances énergétiques et environnementales ainsi qu'un risque sur la durée de vie des équipements. L'alternative consistant à mettre en place deux chaudières bois augmente le coût d'investissement mais doit être envisagée si elle n'obère pas la rentabilité du projet. En France, on opte généralement pour la **bi-énergie : bois en base et combustible fossile (fioul, gaz naturel) en relève automatique.** La chaudière bois est conçue pour assurer l'essentiel des besoins énergétiques (80-90%), ce qui requiert en général son dimensionnement à 40-60% de la puissance totale nécessaire par grand froid : sollicitée de façon prioritaire, elle fonctionne toujours à un taux de charge supérieur au minimum recommandé, avec un bon rendement. La chaudière d'appoint assure le complément de puissance pendant les périodes les plus froides de l'année.

La suite de l'article concerne plus particulièrement les réseaux de chaleur en bi-énergie, certains points pouvant toutefois s'appliquer à la mono-énergie et/ou aux chaufferies dédiées.

Prise en compte du foisonnement des puissances

Pour dimensionner le plus finement possible l'installation bois-énergie, il est indispensable de connaître, heure par heure, les appels de puissance pour chaque bâtiment desservi, en distinguant ce qui relève du chauffage d'une part et de l'ECS d'autre part. Pour obtenir les appels de puissance horaires du réseau, il suffit de sommer ceux de chaque bâtiment desservi. La représentation graphique de ces informations (temps chronologique en abscisses, puissance en ordonnées) constitue ce que l'on appelle une **monotone**.

Le calcul de la puissance bois nécessaire est effectué en tenant compte du foisonnement : **la non-simultanéité des appels de puissance permet de concevoir une installation de puissance inférieure à la somme des puissances maximales unitaires** et, ainsi, d'optimiser le fonctionnement de la chaudière bois (sollicitation à forte charge plus fréquente) et d'en limiter le coût d'investissement.

Par exemple, une école et une salle des fêtes présentent des périodes de chauffage distinctes : la journée et en semaine pour la première, le soir et le week-end pour la seconde. En outre, pour un bâtiment donné (ensemble de logements notamment), il est possible d'effacer en partie l'appel de puissance lié à l'ECS en anticipant la relance du chauffage et/ou en coupant ponctuellement ce dernier pour donner la priorité aux besoins d'ECS (l'inertie du bâtiment permet le maintien de la température ambiante).

Si toutefois une simultanéité occasionnelle et non prévue de besoins devait survenir, l'appoint prendrait la relève.

Chaudière bois de l'hôpital de Pontorson (Manche) - 2,6 MW. *(photo Biomasse Normandie)*

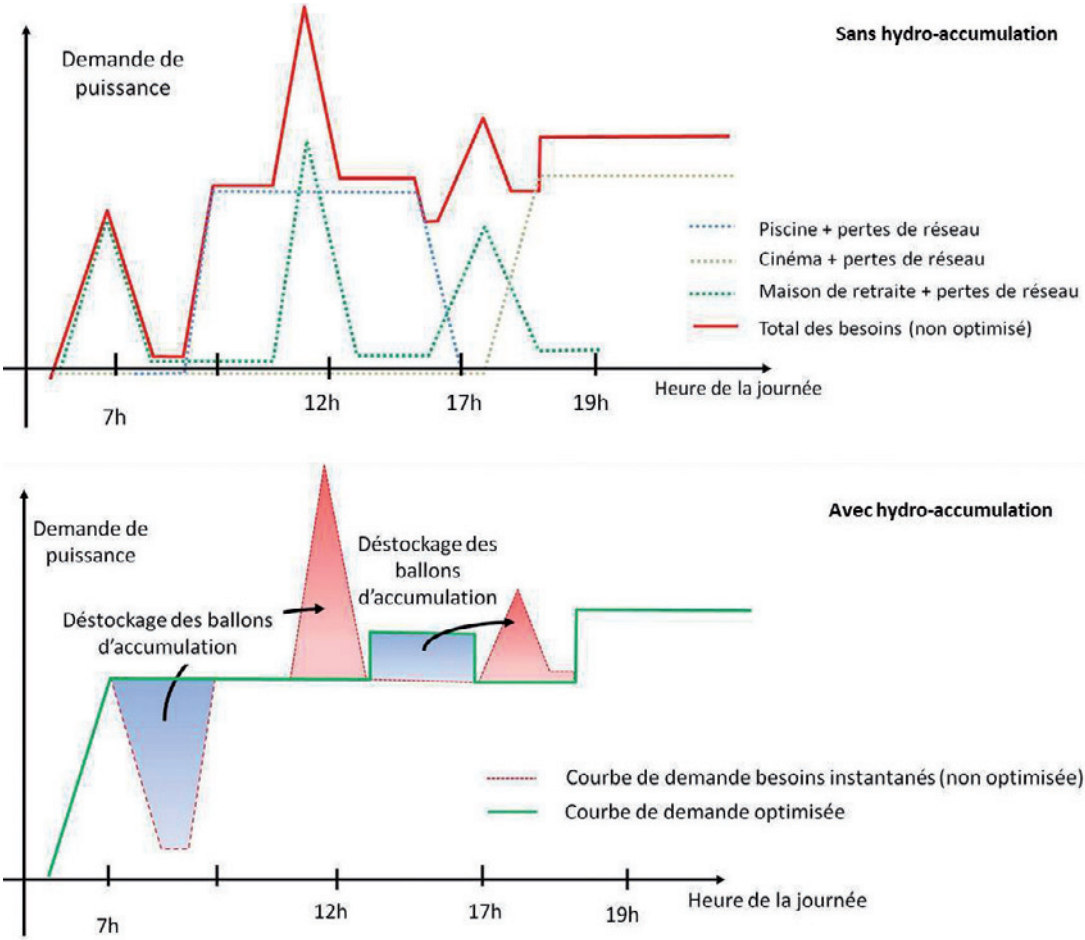
Hydro-accumulation

L'hydro-accumulation est un principe qui consiste à coupler une chaudière avec un réservoir de grande capacité (de quelques m^3 à plusieurs centaines de m^3 selon la puissance de l'installation) assurant le stockage de la chaleur produite par le générateur sous forme d'eau chaude et permettant ainsi de dissocier la production de la chaleur de sa distribution.

Lorsque le générateur fonctionne, le surplus d'énergie produite est stocké dans un ballon tampon. Cette réserve d'énergie est restituée :

- quand la puissance appelée est supérieure à celle de la chaudière bois ;
- de façon différée quand la chaudière est à l'arrêt.

L'hydro-accumulation permet l'installation d'une chaudière bois de moindre puissance



Impact de l'hydro-accumulation sur la courbe de charge d'une chaudière. *(source Viessmann)*

et évite un fonctionnement de cette dernière en "dents de scie" en lissant les appels de puissance (effacement des crêtes et des creux), favorisant ainsi un rendement optimal de l'installation et un taux élevé de couverture des besoins par le bois. En contrepartie, le stockage d'eau chaude suppose un investissement supplémentaire et peut présenter des contraintes en termes d'encombrement, induisant des coûts de génie civil.

L'hydro-accumulation peut être intéressante dans des cas où la demande en énergie est très fluctuante (écoles ou serres horticoles par exemple), pour assurer une production d'eau chaude sanitaire l'été si les besoins sont suffisamment importants ou encore lorsque de grands écarts de température extérieure sont constatés entre le jour et la nuit (zones de montagne).

Fractionnement des puissances

Toujours dans l'optique de maximiser le taux de couverture des besoins par le bois avec le meilleur rendement possible, il peut être pertinent de mettre en place deux chaudières bois (dont une peut, associée à un ballon d'hydro-accumulation, produire l'ECS en été) lorsque la puissance d'une installation collective dépasse 4 à 5 MW. Cette option est également à envisager lorsqu'un usager présente un profil énergétique particulier générant d'importants besoins thermiques l'été ou pour permettre l'adéquation entre moyens de production et besoins d'un réseau dont le développement s'effectue sur plusieurs années.

En limitant les puissances unitaires des chaudières, cette solution permet l'allongement des durées de fonction-

nement à pleine charge d'une part (avec un rendement maximal) **et totale d'autre part** (le minimum technique correspond à une puissance plus faible). Par ailleurs, le fractionnement des générateurs autorise l'alternance des périodes de maintenance, augmentant ainsi la disponibilité globale des chaudières bois. Il découle de tout ceci un meilleur taux de couverture des besoins par le bois. En contrepartie, les investissements à consentir sont supérieurs, de même que les coûts de maintenance et de gros entretien / renouvellement (atténués toutefois par la standardisation de pièces ou fournitures). Il convient en outre de disposer d'une régulation optimisée afin d'assurer un fonctionnement harmonisé des chaudières bois.

Récupération de puissance sur les fumées

La combustion du bois, réaction chimique d'oxydation avec dégagement de chaleur, est un processus qui s'effectue en quatre phases : séchage, pyrolyse / gazéification, oxydation des gaz, combustion du résidu charbonneux. **L'énergie nécessaire pour évaporer l'eau contenue dans le bois (première phase) se retrouve intégralement dans les fumées et peut être récupérée, en plus ou moins grande proportion, en recourant à deux technologies utilisant comme source froide le retour du réseau : l'économiseur et le condenseur**.

L'économiseur permet de valoriser la chaleur sensible (quantité d'énergie récupérée en abaissant la température des fumées sans atteindre leur point de rosée, l'eau restant ainsi à l'état gazeux) et de gagner 3 à 5 points de rendement supplémentaires pour un fonctionnement à puissance nominale. C'est une technologie que l'on peut mettre en œuvre aisément (un simple échangeur de chaleur fumées / eau installé au pied du conduit de fumées) et dont les coûts d'exploitation sont bien maîtrisés.

Outre la récupération de la chaleur sensible, un condenseur permet aussi celle de la chaleur latente provenant du changement de phase de l'eau contenue dans les fumées, la température de ces dernières étant abaissée en-deçà du point de rosée. C'est une technologie plus complexe dont la performance dépend du couple taux d'humidité du bois / température de retour du réseau (qui doit être inférieure à 60 °C, sachant que l'efficacité est d'autant meilleure que la température est basse). Les combustibles des chaufferies collectives présentent en général une humidité variant de 30 à 55% de la masse brute ; dans ce cas, le gain de rendement à pleine charge fluctue entre 10 et 25 points pour une température du fluide caloporteur de 50 °C. La récupération d'énergie par condensation des fumées est adaptée aux serres maraîchères et horticoles chauffées, aux piscines, au chauffage par des planchers chauffants (logements neufs notamment)… et permet de diminuer la puissance de la chaudière bois tout en maintenant un taux de couverture des besoins par le bois constant. Cette technologie est toutefois encore peu développée en France.

Sommet de la chaudière bois (à gauche) et module de condensation des fumées (à droite). *(photo Compte R)*

Exploitation optimisée

Une fois l'installation correctement dimensionnée, il convient d'en assurer la réalisation puis l'exploitation. L'optimisation de cette dernière est étroitement liée à la combinaison des trois éléments clés suivants :

- **la bonne conception de l'installation**, qui a été dimensionnée et réalisée pour répondre à un besoin précis et fonctionner avec un type de combustible donné ;
- **les caractéristiques du combustible** (taux d'humidité, granulométrie…), qui doivent être compatibles avec la chaudière mais qui peuvent varier, dans des proportions acceptables, d'une livraison sur l'autre ;
- **le niveau de prestation de l'exploitant** qui va entretenir, régler et adapter le

fonctionnement de l'installation (vitesse d'avancée du bois dans le foyer, débits d'air...) aux besoins des usagers et aux caractéristiques du combustible, de manière à obtenir une combustion optimale et, par voie de conséquence, la meilleure efficacité énergétique possible.

Il n'y a pas de configuration idéale (il n'existe pas, par exemple, de combustible universel donnant de bons résultats dans toutes les chaudières), mais uniquement des règles de l'art et des cahiers des charges à respecter, avec des solutions adaptées à chaque contexte.

Une distribution de chaleur épousant les besoins des usagers

De la chaufferie aux usagers, la chaleur est transportée par le réseau primaire puis, par le biais des échangeurs (sous-stations) installés dans les bâtiments desservis, par les réseaux secondaires parcourant ces derniers. Dans cette phase de distribution, **l'objectif est de fournir la puissance appelée par des réseaux secondaires de caractéristiques variées, tout en limitant les déperditions de chaleur et en minimisant les consommations électriques induites par le fonctionnement du réseau primaire** (qui peut être composé d'une ou plusieurs branches partant de la chaufferie centrale).

Régime de température du réseau

Les émetteurs de chaleur (radiateurs, planchers chauffants) d'un réseau secondaire sont dimensionnés de telle sorte que, pour une température extérieure très basse (dite "de base"), ils soient capables de fournir la puissance nécessaire pour satisfaire les besoins de chauffage des pièces dans lesquelles ils sont installés (dépendants d'une température de consigne). Cette puissance est obtenue par la combinaison de trois paramètres :

- la surface d'échange (taille de l'émetteur) ;
- l'écart de température entre l'air ambiant (température de consigne) et le fluide caloporteur (caractérisé par son régime de température, c'est-à-dire les températures à l'entrée et à la sortie de l'émetteur) ;
- le débit du fluide.

Les marges de manœuvre sur ce dernier paramètre sont assez réduites puisque la vitesse du fluide dans les canalisations intérieures doit être limitée pour éviter les nuisances sonores. Ainsi, dans un bâtiment existant, on est tributaire du régime de température utilisé pour la conception des émetteurs (de l'ordre de 85-90 °C / 65-70 °C le plus souvent), sauf à effectuer une rénovation thermique performante de l'enveloppe qui diminuerait les besoins de chauffage et donc la puissance maximale appelée (la taille de l'émetteur restant la même, il est alors possible de diminuer la température du fluide). A contrario, dans une construction neuve, tout est envisageable puisque rien n'existe : il est ainsi possible de concevoir un réseau secondaire fonctionnant à basse température.

La fourniture d'ECS exige quant à elle une température minimale de 60 °C en sous-station (lutte contre les légionnelles) donc une température du fluide dans la canalisation aller du réseau primaire d'au moins 65 °C.

Le régime de température du réseau primaire devant nécessairement être compatible avec celui du réseau secondaire le plus contraignant, il est très fréquemment de 100 °C / 80 °C. Cependant, dès lors que l'architecture globale du réseau reste cohérente, il peut y avoir plusieurs branches de réseau partant de la chaufferie centrale, dont une en basse température pour desservir des bâtiments neufs, une piscine… (avec, par exemple, un régime de 75 °C / 35 °C, l'écart important de température entre l'aller et le retour permettant d'obtenir une puissance donnée avec un débit moindre) ; dans ce cas, l'installation d'un équipement de condensation des fumées est envisageable.

Diamètres des canalisations

Un réseau de chaleur est dimensionné de manière à ce que chacun de ses tronçons soit en mesure de délivrer la puissance maximale appelée par l'ensemble des usagers situés en aval, cette dernière étant proportionnelle au débit du fluide et à la différence de température entre la canalisation aller et la canalisation retour : une fois le régime de température défini (en fonction des contraintes liées aux réseaux secondaires en aval des sous-stations et à la fourniture d'ECS par le réseau), on en déduit un débit.

La vitesse du fluide dans une canalisation ne doit pas être trop élevée pour limiter la corrosion par érosion mais suffisante pour éviter l'embouage (dépôt de particules). Ainsi, puisque le débit est connu, une **plage de diamètres possibles pour le tronçon de canalisation peut être définie**, sachant que l'offre commerciale ne permet de disposer que de quelques diamètres standard.

Le débit souhaité est obtenu grâce à des pompes de circulation qui doivent en outre compenser des pertes de charge liées à la rugosité du matériau composant la canalisation, à la viscosité du fluide (variable selon la température) et aux singularités du réseau (coudes…), occasionnant ainsi des consommations d'électricité d'autant plus importantes que les pertes de charge le sont. Toutes choses égales par ailleurs, ces dernières (et donc les frais d'électricité) seront moindres si l'on augmente le diamètre de la canalisation, mais il faudra alors supporter un coût d'investissement plus élevé.

Une fois la plage de diamètres possibles déterminée, **le choix final se fait donc**

sur la base d'un optimum économique qui, à ce stade, intègre aussi les déperditions de chaleur.

Déperditions de chaleur d'un réseau

Les déperditions de chaleur d'un réseau dépendent de paramètres que l'on peut regrouper en trois catégories :

- paramètres liés au **climat et au sol** :
  - température extérieure ;
  - conductivité thermique du sol ;
  - profondeur de l'axe de la canalisation ;
- paramètres liés aux **besoins thermiques des usagers** :
  - température du fluide ;
  - diamètre de la canalisation ;
- paramètres liés à **l'offre commerciale** :
  - épaisseur d'isolant ;
  - conductivité thermique de l'isolant.

On voit que les **déperditions ne sont pas impactées par le débit du fluide et sont donc indépendantes de la quantité d'énergie véhiculée**. Ainsi, dès lors que les caractéristiques propres à la canalisation et au régime de température du fluide sont figées, les pertes sont constantes (à l'impact de la température extérieure près). On peut également en déduire que plus la quantité d'énergie distribuée est grande, moins les pertes sont importantes en valeur relative.

On note aussi que, toutes choses égales par ailleurs, les pertes d'un réseau confronté à un climat rigoureux (température extérieure basse) sont, en valeur absolue, supérieures à celles observées pour une installation située dans une zone plus clémente (a contratio, elles peuvent être plus faibles en valeur relative, les besoins en énergie étant plus importants dans le premier cas).

Puisqu'il n'est pas possible d'agir sur les paramètres liés au climat et au sol (sauf éventuellement et dans une certaine mesure, sur la profondeur de l'axe de la canalisation et la nature du matériau utilisé pour le remblaiement de la tranchée), **la minimisation des déperditions de chaleur peut être obtenue :**

- lors de la conception / réalisation : choix d'une isolation performante pour la canalisation (sur-isolation) ; le diamètre est une résultante de l'arbitrage technico-économique et sa détermination n'est que partiellement liée à la réduction des pertes ;

- lors du fonctionnement : modulation de la température du fluide au départ de la chaufferie en fonction des besoins réels des usagers.

Sur-isolation des canalisations

L'offre commerciale de base des fabricants de canalisations pré-isolées correspond à une gamme de tubes de différents diamètres intérieurs (diamètres nominaux normalisés) recouverts d'une épaisseur standard d'isolant. **La sur-isolation consiste à augmenter l'épaisseur d'isolant autour de la canalisation.**

Cette solution, possible uniquement lors de la création ou de l'extension d'un réseau, génère un surcoût d'investissement qu'il convient de comparer aux économies de combustibles (bois et appoint) rendues possibles par la diminution des déperditions de chaleur. Ainsi, la sur-isolation n'est a priori pas utile sur la canalisation retour d'un réseau basse température.

Ajustement dynamique de la température et variation de la vitesse des pompes de circulation

Le régime de température du réseau est défini en fonction de la puissance maximale qui doit être délivrée. Comme cette dernière n'est appelée que sur une très courte durée (jours les plus froids), le réseau peut véhiculer sur la grande majorité de sa période de fonctionnement une puissance moindre. Pour cela, il est possible de réduire l'écart de température entre l'aller et le retour et/ou de réduire le débit du fluide (et donc la vitesse des pompes de circulation), dans une certaine mesure toutefois.

Canalisation en acier avec isolation standard. *(photo Biomasse Normandie)*

Pour minimiser les déperditions du réseau, il convient d'obtenir la température retour la plus basse possible. Celle-ci étant fixée, l'ajustement porte alors sur la température départ : il peut être effectué en fonction de la température extérieure ou, plus finement, selon les appels de puissance réels des usagers. Toutefois, la température départ doit rester au moins égale à 65 °C pour la fourniture d'ECS ; quand ce plancher est atteint, la température retour dépend de la puissance appelée et ne peut alors plus être fixée (sauf à faire varier le débit).

Pour limiter les consommations d'électricité des pompes de circulation, il est possible de faire varier la vitesse de ces dernières pour ajuster le débit du fluide aux besoins thermiques des usagers. Comme la puissance de la pompe (donc les consommations) varie en

fonction du cube de sa vitesse de rotation (donc du débit du fluide), si celle-ci est divisée par deux, les consommations sont divisées par huit. La mise en place d'un variateur de vitesse est très vite rentabilisée : systématique sur les gros réseaux de chaleur, il serait bien qu'elle soit généralisée sur les petits.

Il convient toutefois de remarquer que **les deux actions précédentes** (ajustement de la température et variation de la vitesse des pompes) ont chacune pour impact de diminuer la puissance véhiculée par le réseau et qu'elles **ne peuvent donc être mises en œuvre simultanément que dans la mesure où cette puissance reste supérieure à la puissance appelée**. La préséance de l'une sur l'autre est principalement une décision d'ordre économique.

Une optimisation de la production / distribution propre à chaque projet

Les actions permettant d'améliorer la performance énergétique d'une installation bois-énergie sont multiples, tant au stade de la production de chaleur qu'à celui de sa distribution. Certaines sont simples, d'autres plus complexes. Mais dans tous les cas, **il est nécessaire de les analyser dès le stade de la conception du projet de manière à bien appréhender leur intérêt potentiel et anticiper les aléas qui pourraient amoindrir la performance envisagée lors de la vie de l'installation.** Quatre remarques fondamentales méritent d'être formulées :

- chaque projet est différent et présente des caractéristiques spécifiques, surtout lorsqu'il y a fourniture de chaleur à plusieurs usagers ; la disposition spatiale de la chaufferie centrale et des bâtiments à desservir peut notamment avoir un impact important sur la pertinence des options envisageables (par exemple, fonctionnement du réseau l'été, en liaison avec la production d'eau chaude sanitaire) ;

- il est impératif de bien considérer le triptyque production / réseau primaire / réseau secondaire : chacun de ses membres présente des contraintes qui lui sont propres et, pourtant, les interactions entre eux sont multiples ; ainsi, l'optimisation de chacune des parties indépendamment des autres n'aboutit pas nécessairement à celle de l'ensemble ;

- les solutions techniques et technologiques retenues sont en général celles qui correspondent au meilleur équilibre économique ; bien souvent, ce dernier ne peut être appréhendé intuitivement puisque chaque action d'optimisation entraîne des coûts d'investissement et d'exploitation supplémentaires mais en évite certains autres, avec en outre des modifications des paramètres énergétiques de l'installation (puissance bois, quantité d'énergie consommée, taux de couverture bois, température réseau…) nécessitant en général de refaire l'analyse technico-économique ;

- la bonne gestion des interfaces entre production et distribution requiert une concertation entre gestionnaires des réseaux primaire et secondaires afin de bien planifier les besoins de chaleur (régime de température, puissance appelée, horaires de relance…) et anticiper les éventuels problèmes.

Pompes de circulation et départ du réseau de chaleur. *(photo Ceden)*

✔ ZOOM
La performance énergétique au cœur d'un précédent Cahier du bois-énergie

Le Cahier du bois-énergie n° 42, paru en juin 2009, avait pour thème "Efficacité énergétique du chauffage au bois" et contenait trois articles principaux :

- "De la source primaire à l'utilisation finale, toutes les filières énergétiques supportent des pertes ! Le bois-énergie plutôt moins que les autres" ;
- "La condensation des fumées émises par la combustion du bois ou comment valoriser l'eau contenue dans le combustible" ;
- "Améliorer les performances énergétiques de réseaux techniques de distribution d'énergie calorifique existants par la fourniture de chaleur à des tiers".

Complémentaire du présent dossier, le Cahier n° 42 est disponible auprès du Bois International (www.boisinternational.com).

Performances énergétiques des chaufferies bois : paramètres influents et pistes d'optimisation

On distingue deux types de rendements pour une chaudière :

- le rendement de production, établi pour une durée de fonctionnement déterminée ; il est donné par le rapport entre l'énergie fournie en sortie de la chaudière et l'énergie contenue dans le combustible ;
- le rendement instantané (ou de combustion) dont résulte le rendement de production.

Le rendement instantané, qui fait l'objet du présent article, est établi à l'aide de plusieurs moyens :

- mesure, grâce à un analyseur de fumées :
• des pertes de la chaleur contenue dans les fumées : température de fumées, taux d'oxygène (O_2) résiduel, humidité des fumées ;
• des pertes dues aux imbrûlés gazeux : taux de monoxyde de carbone (CO) ;
- évaluation des pertes calorifiques par rayonnement des parois de la chaudière (1 à 2%) et par les imbrûlés solides (taux de carbone dans les cendres).

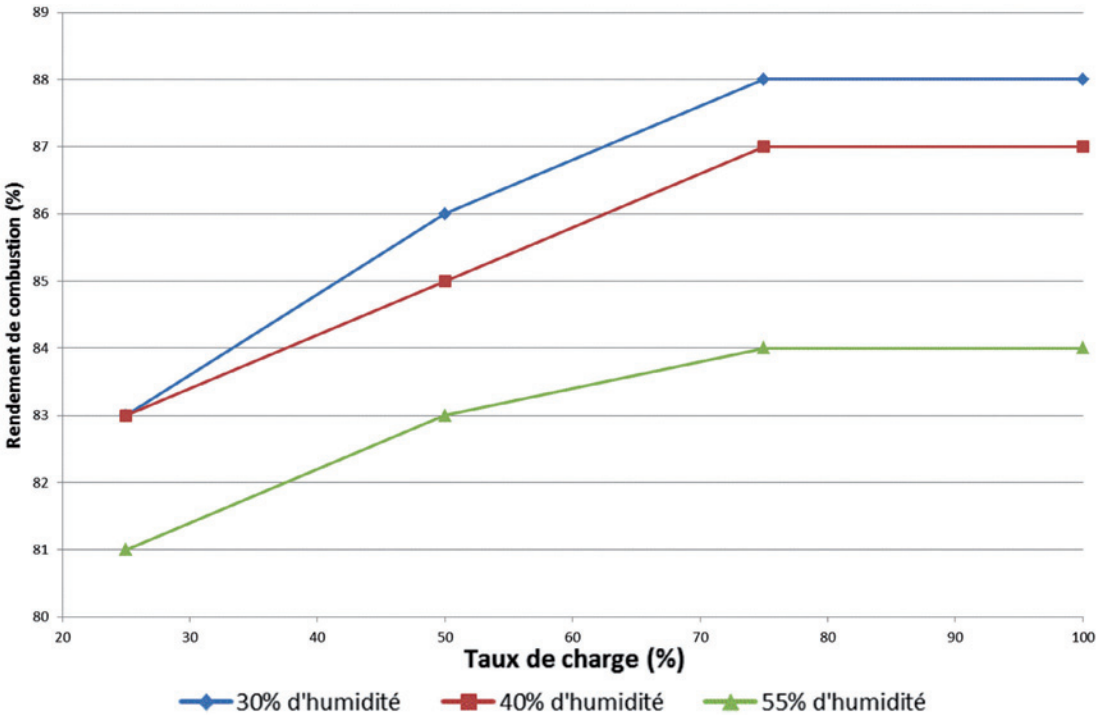
Ce rendement permet de s'assurer du bon fonctionnement de la chaudière en temps réel et de valider les réglages de celle-ci.

Les paramètres influençant les performances énergétiques d'une chaudière sont de deux sortes :

- intrinsèques à l'équipement : conception de la chaudière et du système de régulation de la combustion associé ;
- extérieurs : combustible utilisé, exploitation de la chaufferie (qui nécessite des compétences spécifiques des techniciens en charge des installations, tant pour les réglages que l'entretien).

Un fonctionnement à puissance nominale avec un combustible adapté

Les rendements de combustion des chaudières affichés par les fabricants sont relativement "optimistes" : ils correspondent à des valeurs atteintes uniquement à plein régime, avec un combustible de caractéristiques précises. Lorsque ces



Evolution du rendement en fonction du taux de charge et du taux d'humidité du combustible pour une chaufferie bois de 2 MW. *(source Biomasse Normandie, d'après Weiss France)*

conditions optimales ne sont pas remplies, le rendement est altéré ; c'est pourquoi il est impératif, d'une part, de dimensionner l'installation de manière à faire fonctionner la chaudière à puissance nominale le plus souvent possible et, d'autre part, d'utiliser un combustible adéquat. Un fonctionnement à faible taux de charge occasionne une combustion incomplète et donc une dégradation des performances énergétiques et environnementales du système, avec en outre un risque de corrosion des équipements à cause des températures de fumées trop basses pouvant engendrer des condensats acides.

Néanmoins, entre le régime de la puissance nominale et le taux de charge minimum (15 à 25% suivant les constructeurs), les systèmes de régulation couramment utilisés pour gérer les paramètres de combustion (vitesse d'introduction du combustible, ouverture des volets modulants alimentant les équipements en air primaire et air secondaire, rythme d'avancée de la grille mobile et mise en marche / arrêt des équipements) permettent d'optimiser les performances énergétiques des chaudières bois. Dans ces conditions, les rendements sont certes légèrement moins bons mais restent supérieurs à 80%.

Le taux d'humidité du combustible influence également le rendement de combustion des chaudières : la vaporisation de l'eau contenue dans le combustible (séchage) nécessite d'autant plus d'énergie que le bois est humide. Selon le taux de charge de la chaudière et le taux d'humidité du combustible (tous deux situés dans la fourchette autorisée par le constructeur), le rendement peut varier de 2 à 5 points.

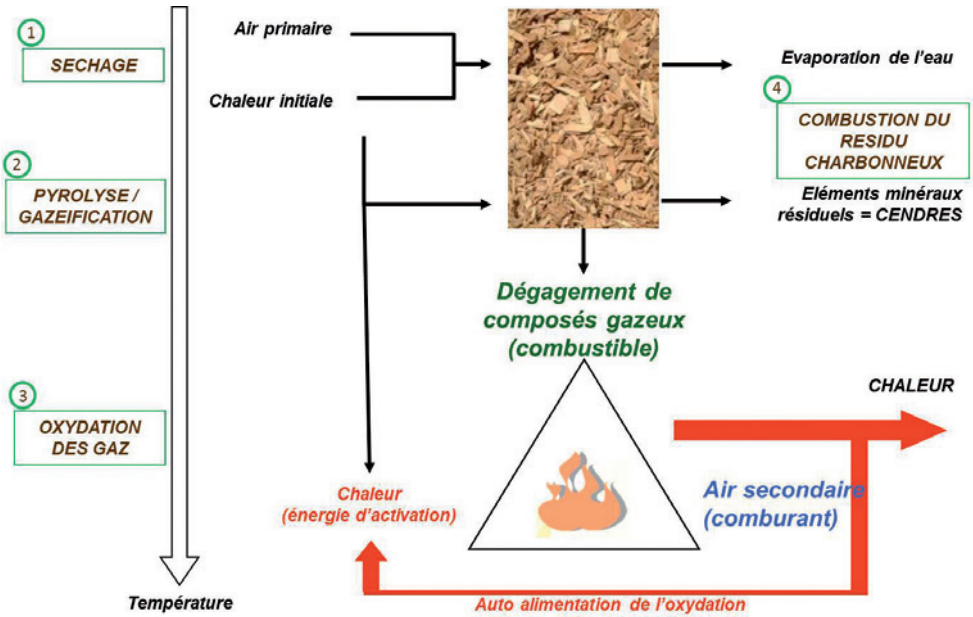
Une gestion des apports d'air dans le foyer pour une combustion par étapes

Lors de son réchauffement dans le foyer, le bois est, après séchage, séparé en hydrocarbures solides et gazeux sous l'action de l'air comburant primaire traversant le lit de braises. A 500 °C, 85% de la masse est libérée sous forme gazeuse avec production de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Ces gaz combustibles sont ensuite mélangés à l'air comburant secondaire en vue de leur oxydation. Réguler ainsi la combustion en plusieurs étapes permet d'atteindre une grande efficacité tout en générant un minimum de polluants.

A la différence des combustibles conventionnels tels que le fioul ou le gaz, le bois nécessite, pour que la combustion soit oxydante, l'apport systématique d'un excès d'air dans le foyer, à un niveau dépendant du type de combustible et de la technologie de la chaudière (il ne doit toutefois pas refroidir le foyer).

L'air primaire est injecté sous la grille, dans différents compartiments correspondant aux différentes phases de transformation du combustible qui ont lieu sur la grille. Les installations prévues pour brûler un

Les quatre phases de la combustion du bois *(source Biomasse Normandie)*



combustible très humide peuvent être équipées d'un système de préchauffage pour faciliter le séchage du bois : des gaz chauds sont prélevés dans la partie aval du foyer et mélangés à de l'air avant d'être injectés sous la grille, en entrée du foyer. Sur certaines installations, ce sont au contraire des fumées froides qui sont prélevées au niveau du traitement des fumées pour être mélangées avec l'air, le but étant d'apporter un flux suffisant pour refroidir les grilles (sans toutefois augmenter la quantité totale d'oxygène apporté) de façon à bien effectuer une combustion étagée.

L'air secondaire est quant à lui insufflé par des orifices situés en haut du foyer pour assurer la combustion des gaz de pyrolyse. La régulation des amenées d'air et de la recirculation des fumées est réalisée grâce au contrôle des fumées en sortie de chaudière : teneur en oxygène résiduel, taux d'humidité (directement lié au taux d'humidité du combustible) et température.

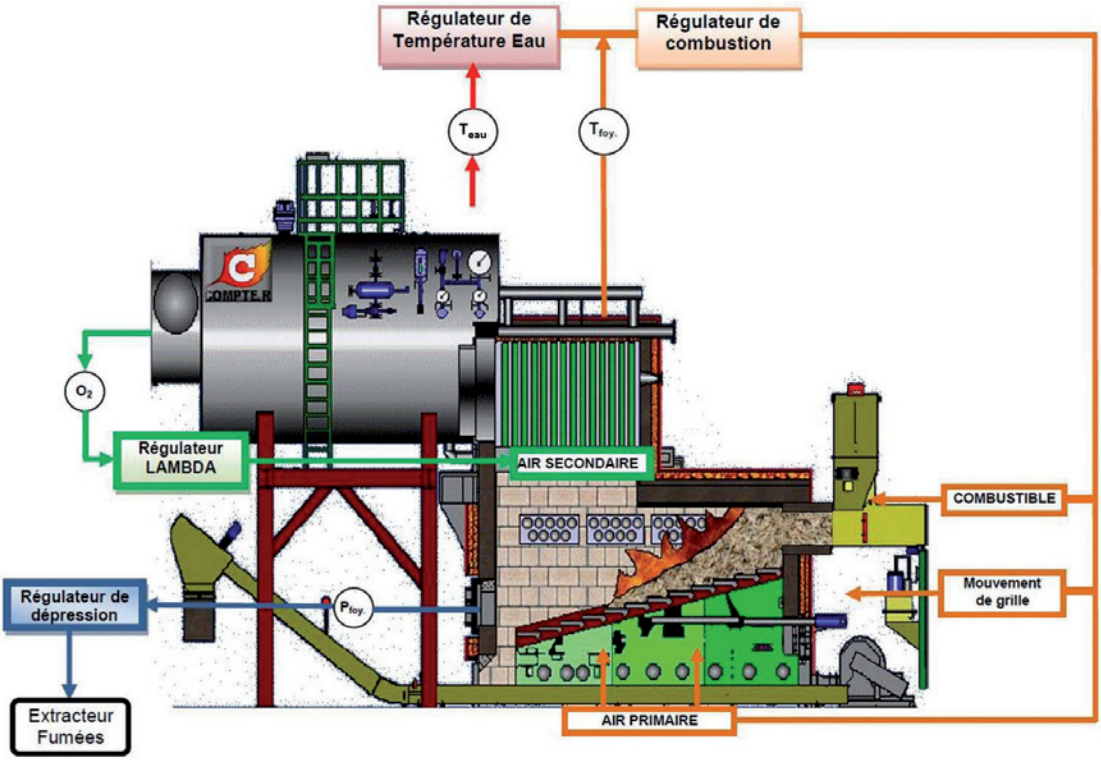
Un ramonage régulier de la chaudière pour un bon échange de chaleur

Des températures de fumées trop élevées sont généralement synonymes de mauvais échange qui peut être dû à un encrassement, d'où la nécessité d'un nettoyage des tubes de fumées de la chaudière par injection automatique d'air comprimé et ramonage manuel régulier. En règle générale, on veille toutefois à maintenir une température supérieure à 130 °C afin d'éviter le risquer d'endommagement des conduits par condensation de l'eau contenue dans les fumées.

Ainsi, pour un fonctionnement à puissance nominale, une teneur en oxygène résiduel de 8% et un combustible à 30% d'humidité, le gain en rendement est estimé à 5 points lorsque la température des fumées passe de 200 à 130 °C (source Viessmann).

Une récupération de chaleur sur les fumées à privilégier dès que possible

La température élevée des fumées en sortie de chaudière peut conduire à une réflexion sur la récupération de l'énergie rejetée dans l'atmosphère. Le recours à des équipements annexes tels que les



Principe de régulation d'une chaudière bois. *(Compte R.)*

économiseurs et les condenseurs peut dès lors s'avérer très pertinent.

Economiseurs

Un économiseur est un échangeur air / eau permettant de récupérer une partie de l'énergie contenue dans les fumées (chaleur sensible), variable selon la température et le débit de ces dernières. Ils sont généralement employés pour relever la température de retour réseau, parfois pour préchauffer l'air primaire avant son injection dans le foyer. On prendra évidemment soin de limiter la température des fumées en sortie d'économiseur à environ 130 °C afin d'éviter tout phénomène de condensation pouvant altérer la durée de vie de l'installation. En considérant un économiseur couplé à une chaudière de 5 MW et dans les conditions optimisées de combustion, le gain de rendement varie entre 1 et 3 points en fonction de l'état de charge de la chaudière (source Weiss France).

Condenseurs

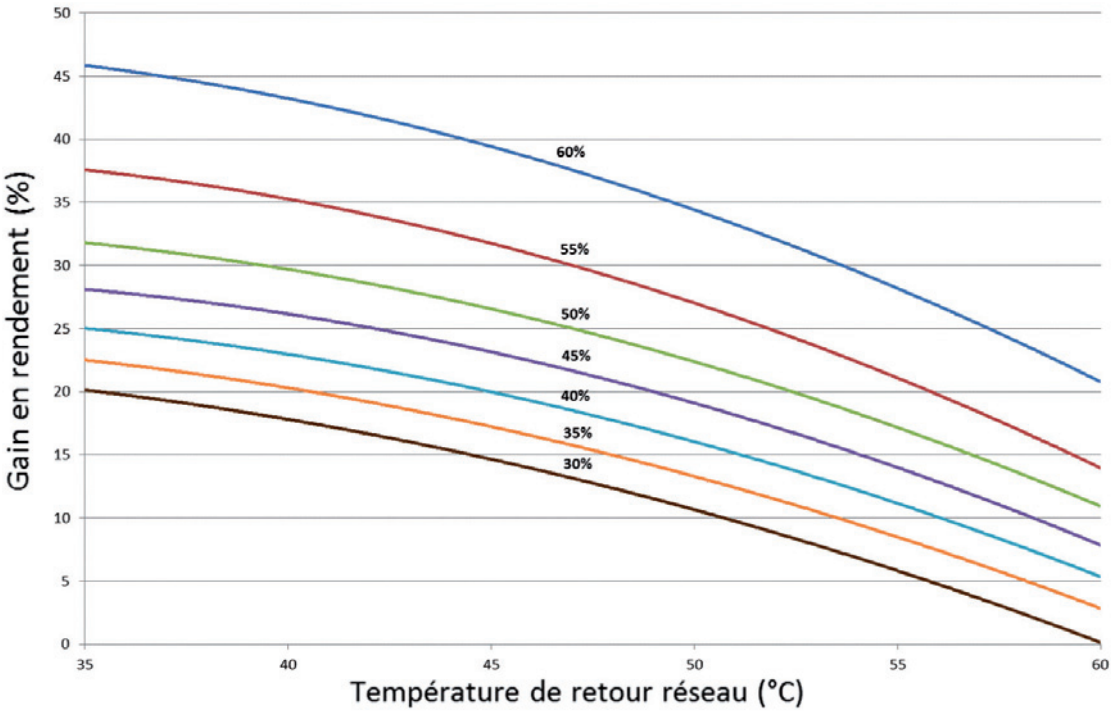
Le bois présente une singularité : il contient une part importante d'eau libre ou liée même lorsque le combustible est considéré comme sec. Au cours de la conversion thermochimique, une partie de l'énergie qu'il contient doit donc être consacrée à l'évaporation de cette eau. Cette dernière est rejetée sous la forme de vapeur dans l'atmosphère, alors qu'elle pourrait être récupérée en vue d'améliorer sensiblement l'efficacité énergétique des chaufferies bois en refroidissant les fumées au contact d'une source froide (retour du réseau de chauffage).

Les condenseurs permettent ainsi de valoriser non seulement la chaleur sensible des fumées (comme c'est le cas des économiseurs) mais aussi la chaleur latente. Cette dernière peut être captée lorsque la température des fumées descend en-deçà de leur point de rosée.

Plus le bois est humide, plus les fumées présentent une teneur en eau élevée. Cette dernière influence le point de rosée des fumées qui se situe à une température d'autant plus élevée que les fumées sont humides : environ 70 °C pour un combustible à 55% d'humidité et 60 °C pour 25% d'humidité, dans les conditions idéales de combustion.

Dans tous les cas, la condensation nécessite une température de la source froide inférieure au point de rosée des fumées. **Néanmoins, ce n'est pas suffisant :**

Condensation des fumées : évolution du gain en rendement en fonction de l'humidité du combustible et de la température de retour du réseau *(Biomasse Normandie, d'après Tamult)*



l'efficacité étant d'autant plus importante que la température de retour du réseau est basse, il est impératif de chercher à minimiser celle-ci. Ainsi, la condensation des fumées peut être étudiée sur un réseau (ou une branche de réseau) à basse température alimentant des bâtiments nécessitant des régimes de températures faibles pour leur chauffage : piscines, serres horticoles, logements avec planchers chauffants, quartiers neufs ou bénéficiant de programmes de rénovation thermique importants… Par ailleurs, le gain de rendement permis par la condensation est également lié aux conditions de combustion et donc à l'état de charge de la chaudière. Bien évidemment, il faut vérifier que le gain de rendement obtenu permette de compenser les surcoûts d'investissement et d'exploitation liés à la mise en œuvre d'un économiseur et/ou d'un condenseur. Si tel est le cas, l'installation de ces équipements de récupération de l'énergie contenue dans les fumées est à privilégier.

Réseaux de chaleur : le temps de l'efficience

Afin d'analyser l'impact, sur l'efficience énergétique d'un réseau, des différentes solutions techniques mises en œuvre par les exploitants, des simulations ont été réalisées en vue d'estimer les pertes thermiques et les consommations d'électricité d'un réseau de chaleur en faisant varier plusieurs paramètres. Le réseau type permet la couverture des besoins de chauffage d'octobre à mai et alimente en eau chaude sanitaire (ECS) des bâtiments du secteur sanitaire et social ainsi qu'un centre aquatique tout au long de l'année. Dans sa configuration de base, il ne dispose d'aucun système de régulation de la température ni du débit, mais il existe tout de même deux régimes de températures distincts pour la saison de chauffe et l'été.

✔ ZOOM

Réseau de chaleur type

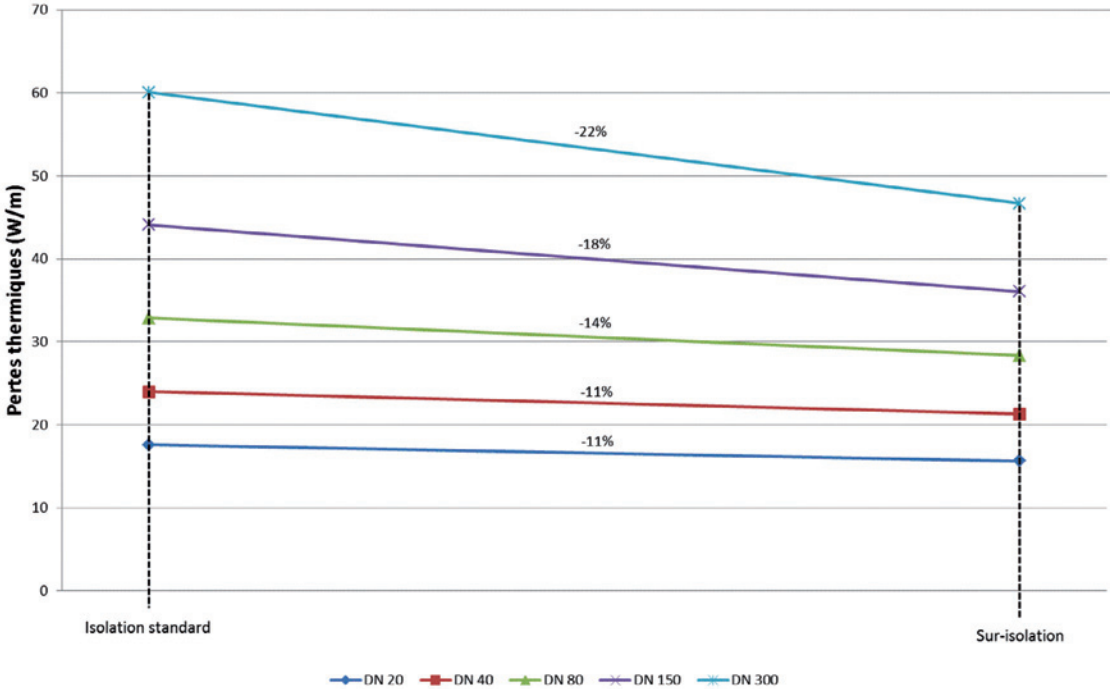
Pmaximale appelée : 10 MW
Text base : -7 °C
Régime température saison de chauffe : 100 / 85 °C
Régime température été : 75 / 70 °C
Longueur : 4.500 ml
Nombre de sous-stations : 23
Fourniture énergie : 12.000 MWh

L'info 100% filière bois
| S'informer | Comprendre | Gérer | S'équiper
Découvrez nos offres d'abonnements sur www.leboisinternational.com

LE BOIS INTERNATIONAL, l'hebdomadaire des professionnels de la filière bois
Chaque semaine, **Le Bois International**, l'officiel du bois offre aux professionnels un tour d'horizon complet de l'actualité économique et technique de la filière (1re et 2e transformation) et propose, dans ses deux éditions, de nombreuses opportunités grâce à ses 16 pages d'annonces classées.

VBI concepteur de scieries
INGÉNIERIE • CLÉ EN MAIN • SAV
Présent au salon LIGNA 06.05. – 10.05.2013 · HANNOVER · GERMANY
Contactez-nous pour un rendez-vous
HALL 27 STAND D 06 Primultini — LIGNE DE SCIAGE
HALL 27 STAND B 53 häwa — PAR À GRUMES
HALL 27 STAND D 42 KALLFASS — MÉCANISATION
HALL 27 STAND B 52 ZENI — BROYEUR
HALL 13 STAND C 31 AGRO — CHAUDIÈRE
Vincent Bleesz International SAS - Z.A. du Muckental • 3, Allée de l'Europe - 67140 BARR
Jonathan : +33 6 78 82 29 62 - Vincent : +33 6 88 67 79 68 • Fax : +33 3 88 08 06 50 - Email : Info@vbi-bois.fr
www.vbi-bois.fr

Hypothèses :
Température extérieure : 7°C - Température départ réseau : 100°C - Profondeur des canalisations : 1,1 m - Espacement des canalisations : 0,4 m
Conductivité thermique de l'isolant : 0,027 W/m.K. - Conductivité thermique du sol : 0,307 W/m.K.



Impact de la sur-isolation des canalisations sur les déperditions de chaleur. *(source Biomasse Normandie, d'après Wannitube)*

Amélioration des performances d'isolation thermique des canalisations

La dynamique d'optimisation de la résistance thermique des matériaux isolants utilisés dans la construction ayant été amorcée dans le cadre de l'amélioration des bâtis, elle s'est logiquement appliquée sur les gaines isolant les canalisations de transport de la chaleur sur les réseaux urbains. Ainsi, si l'on recense les références commerciales des entreprises du secteur, on constate que la conductivité thermique des isolants utilisés est passée de 0,033 W/m.K avant 2006 à 0,027 W/m.K en 2012. Depuis peu, les fournisseurs de canalisations dédiées au transport de fluides thermiques sont amenés à proposer des canalisations "sur-isolées", caractérisées par une surépaisseur de l'isolant pouvant atteindre 70% de l'épaisseur d'un isolant dit standard.

Une simulation effectuée sur le modèle numérique entre la configuration de base du réseau (isolant avec une conductivité thermique de 0,027 W/m.K) et un réseau "sur-isolé" met en évidence un gain annuel de rendement de 2 points (en période estivale, le rendement est amélioré de 5 points). Il conviendrait de vérifier si ce gain de rendement permet de compenser le surcoût d'investissement dans des canalisations plus performantes.

Non desserte de certains tronçons de réseaux en période estivale

La fourniture d'énergie en période estivale pour assurer les besoins en ECS nécessite de faire circuler de faibles quantités de chaleur alors que le réseau est dimensionné pour les besoins de chauffage d'hiver. En fonction de la localisation des usagers concernés par rapport à la chaufferie centrale, il peut être judicieux d'opérer un isolement de certains tronçons du réseau pour ne conserver que les portions de canalisations sollicitées en été afin de rationaliser la circulation de l'énergie thermique tout en minimisant les pertes. Dans ce cas, pour les bâtiments les plus

éloignés de la chaufferie centrale, il peut être pertinent d'envisager le maintien d'équipements en place au sein de ces derniers et ainsi disposer de systèmes de production de chaleur décentralisés ; dès lors, le réseau ne sera plus totalement alimenté et son efficacité énergétique s'en verra optimisée.

Sur l'exemple simulé (configuration de base), seuls le centre aquatique, un hôpital et une maison médicale sont approvisionnés en ECS l'été : on constate que le niveau de rendement est alors peu performant (50%). L'hôpital et la maison médicale étant situés à l'extrémité de la branche la plus longue du réseau, on a simulé un fonctionnement du réseau en période d'été sur un périmètre restreint (centre aquatique à environ 500 ml).

La production d'ECS des deux autres établissements est assurée de façon délocalisée. On constate une optimisation du rendement estival du réseau (80%) mais qui globalement se traduit par un gain annuel de 1 point seulement.

Régulation de la température de départ du réseau

Les pertes thermiques occasionnées par la circulation du fluide caloporteur dans les canalisations sont directement proportionnelles à la différence de température entre le sol (et par conséquent la température extérieure) et le fluide. Pour réduire ces déperditions et maximiser le rendement de l'installation, il est possible de moduler la puissance véhiculée par les canalisations selon les appels de puissance réels, en faisant varier la température de départ du fluide caloporteur en fonction de la température extérieure. La température de retour du réseau est fixée à un niveau le plus faible possible, le plus souvent contraint par les limites sanitaires de fourniture d'ECS.

En application au modèle simulé, le passage à une température départ réseau variable permet de gagner 3 points de rendement annuel.

Régulation du débit

Un autre moyen de réguler la puissance thermique véhiculée dans les canalisations (qui ne peut être mis en œuvre simultanément à la régulation de température du réseau que dans la mesure où la puissance fournie reste supérieure à la puissance appelée) consiste à faire varier le débit dans les canalisations en fonction de l'appel de puissance dans les sous-stations. Dans ce cas, ces dernières sont munies de vannes deux voies pilotées par la régulation interne aux bâtiments : dès qu'une chute de température extérieure est relevée, la vanne deux voies s'ouvre et une chute de pression est

Nota bene

Prochaines publications des Cahiers du Bois-énergie : 22 juin | 12 octobre | 7 décembre 2013

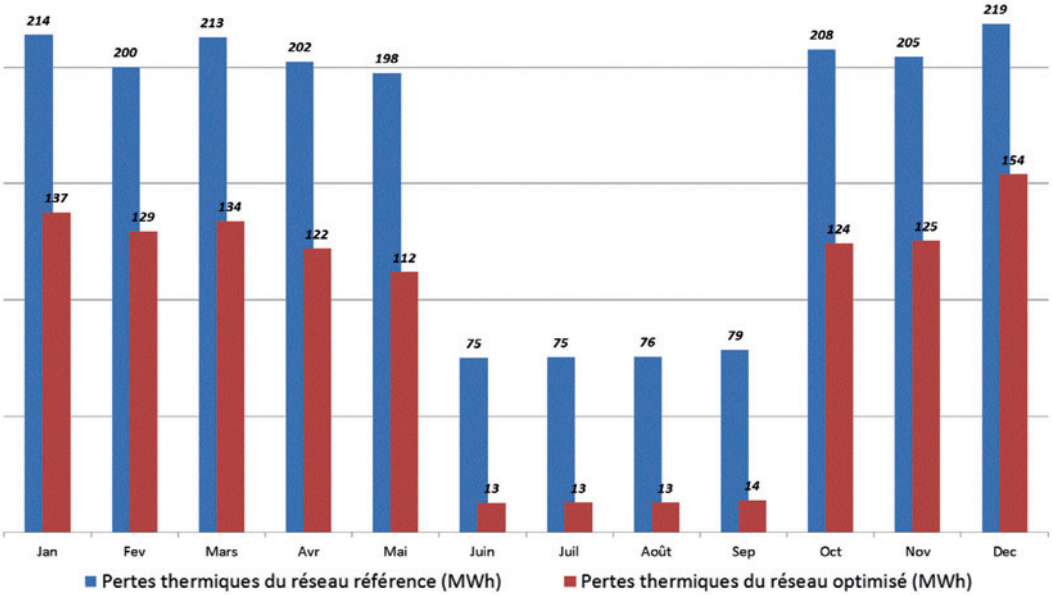
Réservez dès à présent votre espace publicitaire

Le Bois International - 14 rue Jacques Prévert
Tél. : 04.78.87.29.40 - Fax : 04.72.30.04.16
E-mail : publicite@leboisinternational.com

VBI concepteur de scieries
INGÉNIERIE • CLÉ EN MAIN • SAV
Présent au salon LIGNA 06.05. – 10.05.2013 HANNOVER GERMANY
Contactez-nous pour un rendez-vous

Centrale de Cogénération | Séchoir et chaudière | Séchoir à bande | Presse et process à pellets | Briquette

Vincent Bleesz International SAS - Z.A. du Muckental • 3, Allée de l'Europe - 67140 BARR
Jonathan : +33 6 78 82 29 62 - Vincent : +33 6 88 67 79 68 • Fax : +33 3 88 08 06 50 - Email : Info@vbi-bois.fr
www.vbi-bois.fr



Pertes thermiques du réseau dans ses configurations de base etoptimisée *(source Biomasse Normandie)*

observée dans le réseau de chaleur ; le débit primaire est alors augmenté jusqu'à l'obtention de la bonne valeur de pression en bout de réseau. L'exploitant opère donc une régulation du débit véhiculé par les circulateurs primaires du réseau, en fonction du différentiel de pression mesuré au point le plus défavorable du réseau (extrémité), cela afin de maintenir ce dernier constant.

L'amélioration de rendement observée sur les pertes thermiques est nulle (ce qui est normal puisqu'elles ne dépendent pas du débit du fluide mais de sa température). Par contre, on constate un gain important au niveau de la consommation annuelle d'électricité des circulateurs primaires qui passe de 43 à 23 kWh électrique / MWh utile. Par ailleurs, un moteur électrique présente un point de fonctionnement optimal, auquel son rendement est maximum. Ainsi, réguler le débit du réseau primaire ne peut avoir d'intérêt qu'à condition que le rendement des circulateurs, une fois leur vitesse réduite, ne soit pas médiocre et n'occasionne pas de surconsommation d'électricité. Ce point est d'autant plus important que la plage de fonctionnement à vitesse réduite est majoritaire sur les réseaux de chaleur : en effet, on ne recense en moyenne sur une année qu'une dizaine de jours de fonctionnement à pleine puissance quand ces mêmes circulateurs fonctionnement à 30% de leur puissance nominale durant les deux tiers de la saison de chauffe. Une solution consiste donc à installer plusieurs circulateurs en parallèle ou en série, afin de pouvoir disposer du meilleur rendement de pompage sur toute la plage de fonctionnement du réseau de chaleur. Les gestionnaires de réseau installent ainsi souvent deux pompes, de puissance élevée pour l'une et faible pour l'autre, fonctionnant ensemble pour le cœur de la saison de chauffe et séparément le reste du temps (la plus grosse pour la mi-saison et la plus petite pour l'été).

Synthèse

En résumé, si l'on simule la mise en œuvre simultanée de l'ensemble des solutions techniques présentées ci-dessus (hors régulation du débit) sur le réseau de chaleur type, le rendement thermique annuel se trouve amélioré de 6 points par rapport à la configuration de base. Si l'on fait varier le débit, le gain de rendement est de 4 points et de près de 50% des consommations électriques des circulateurs sont économisées.

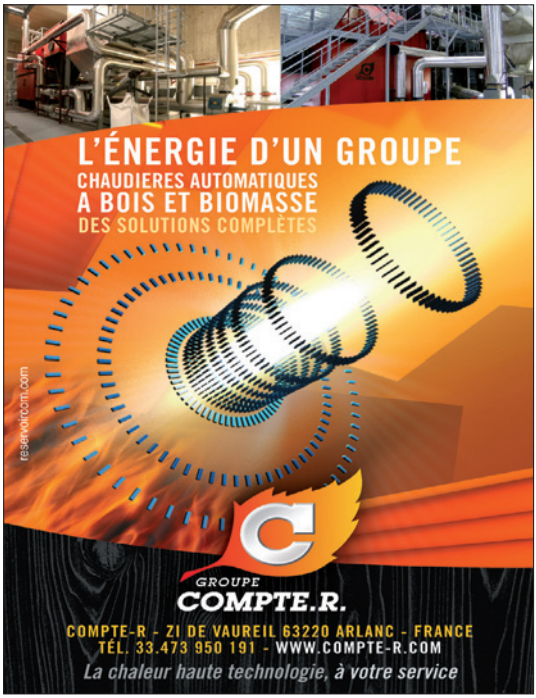
Fonds chaleur et performance énergétique des chaufferies bois-énergie et des réseaux

Des préconisations (voire exigences) en matière de performance énergétique des installations figurent dans la "méthode de calcul du niveau d'aide" du Fonds chaleur. En voici deux exemples.

"L'Ademe recommande fortement l'utilisation de techniques améliorant les performances énergétiques et environnementales, à l'exemple des économiseurs et des condenseurs. Les installations de combustion de la biomasse doivent être dimensionnées en base et le rendement thermique sur PCI de l'installation à puissance nominale doit être supérieur à 85%."

"Afin d'optimiser les performances énergétiques du réseau, une attention particulière sera portée sur le régime de température en cohérence avec les bâtiments à chauffer ; il sera recherché des"delta T °C départ-retour" les plus élevés possible et des températures les plus basses possible en cas de réseaux desservant notamment des patrimoines basse consommation."

Pour plus d'information : www.ademe.fr/fondschaleur



Le BOIS INTERNATIONAL

L'officiel du bois >> Scierie
Exploitation forestière
Bois-énergie

Professionnels de la filière bois

Retrouvez chaque semaine l'actualité professionnelle, technique et économique de la filière bois + le Journal des Annonces du Bois

Édition Verte
(Scierie, exploitation forestière)
+ Le Journal des Annonces du Bois

Découvrez nos offres d'abonnements sur **www.leboisinternational.com**

incluant
Les Rendez-Vous de la Méca
Des dossiers thématiques sur la mécanisation forestière.

Les Cahiers du bois-énergie*
Des synthèses techniques et économiques sur le bois-énergie.
* en collaboration avec le Cibe et l'Ademe.

LE BOIS INTERNATIONAL
14 rue Jacques Prévert - 69700 Givors • Tél. : **04 78 87 29 40** • Fax : **04 72 30 04 16**

ENERGIE BOIS
Office National des Forêts
une ressource renouvelable

ACHETEZ VOTRE BOIS CHEZ CEUX QUI LE CONNAISSENT LE MIEUX

En choisissant www.onf-energie-bois.com, vous optez pour le **1er réseau français de fournisseurs en bois de chauffage et bénéficiez :**

- d'un **large choix de combustibles** : granulés, bûches, plaquettes forestières
- de la garantie de combustibles **bois de qualité, issus de forêts gérées durablement**
- du service de **fournisseurs partenaires de l'ONF** proches de chez vous

www.onf-energie-bois.com

ou contactez-nous au

01 40 19 71 77

Création www.thalamus-c.fr