

Cahier n° 31

La cogénération bois en Europe

SOMMAIRE

- Edito, par Serge Defaye > 12
- La cogénération bois en Europe > 13
- Les technologies de production d'électricité à partir de bois > 14
- La production d'électricité à partir de bois en France > 15
- Fiches de réalisations : > 15
 - Renko (Finlande)
 - Assens (Danemark)
 - Vilnius (Lituanie)
 - Güssing (Autriche)

"Les Cahiers du bois énergie", édités sous la responsabilité de Biomasse Normandie, sont publiés avec le soutien de l'Ademe (Direction des énergies renouvelables, des réseaux et des marchés énergétiques). Ce cahier a été préparé par Stéphane Cousin et Dominique Plumail (Biomasse Normandie) et Serge Defaye (Debat). Mise en page par la Rédaction du Bois International.

Édito

COGÉNÉRATION BOIS : NE PAS SOUS-ESTIMER LES CONTRAINTES ET BIEN ÉVALUER LA RENTABILITÉ

La cogénération consiste à produire simultanément de la chaleur et de l'électricité à partir d'un combustible fossile ou renouvelable. Le programme de l'Union Européenne "Energie soutenable en Europe" affiche un objectif de 450 centrales de cogénération bois supplémentaires à l'horizon 2008. Selon l'Observatoire des énergies renouvelables, ce pari sera difficile à tenir, vu le parc d'installations en fonctionnement et le nombre restreint de pays réellement engagés dans cette voie.

On dispose de deux familles de technologies :

- La production de vapeur pour alimenter une turbine (ou un moteur) ; cette technique parfaitement éprouvée présente l'inconvénient (dans la gamme de puissance envisageable) d'un rendement électrique médiocre, autrement dit de fournir 3 à 4 fois plus d'énergie thermique que d'électricité ;

- La gazéification du bois, avant injection des gaz dans une turbine ou un moteur ; cette option permet d'espérer un rendement électrique meilleur (25 à 35%), mais sa maturité industrielle n'a à ce jour pas été clairement démontrée.

Dans une gamme de 5 à 10 MWé, le ratio chaleur/électricité exige des besoins de vapeur basse pression ou de chaleur équivalent à ceux de 6.000 – 8.000 logements, à proximité de la centrale. Cette contrainte s'accompagne d'une obligation de mobiliser puis de livrer sur un même site 60.000 à 120.000 tonnes de combustible bois par an. Les contextes favorables pour des unités de puissance moyenne ne se rencontrent donc pas fréquemment.

On peut certes construire des unités plus petites (moins de 5 MWé), mais les simulations économiques effectuées à partir des données européennes disponibles montrent que le prix de revient de l'électricité est alors élevé et nettement supérieur à l'obligation d'achat fixée par l'arrêté d'avril 2002. Le ministère de l'Industrie examine actuellement la réévaluation de ce tarif. Cependant, pour que l'équilibre économique d'une cogénération bois soit assuré sur le long terme, le prix d'achat de l'électricité aux producteurs devra atteindre le niveau des pays européens les plus volontaristes (Autriche...).

Lorsque les contraintes précitées sont trop fortes ou que la viabilité économique d'un projet est mal assurée, la production de vapeur basse pression ou de chaleur seule (y compris dans l'industrie) demeure beaucoup plus facile à mettre en œuvre et financièrement beaucoup moins risquée.

Serge Defaye

Debat,

Conseiller technique de Biomasse Normandie

Le 31^e Cahier du Bois Énergie fait suite aux numéros, parus depuis 1992 :

1 - Le chauffage collectif urbain (20 juin 1992)	14 - Le bois énergie sur la toile : les sources d'information accessibles sur Internet (6 janvier 2001)	21 - Séchage du bois en scierie et menuiserie (10 mai 2003)
2 - Les chaudières turbo-bois (14 novembre 1992)	15 - Chauffage et séchage à partir des connexes et des déchets ligneux dans les industries du bois (12 mai 2001)	22 - Le bois énergie, une composante essentielle de la filière forêt bois (12 juillet 2003)
3 - Les cheminées à foyer fermé (24 avril 1993)	16 - De la matière première aux produits élaborés (8 septembre 2001)	23 - Le bois énergie dans les logements sociaux (18 octobre 2003)
4 - Des opérations exemplaires (14 janvier 1995)	17 - Les exploitants de chauffage et le développement du bois énergie (15-22-29 décembre 2001)	24 - Le bois énergie dans les hôpitaux (10-17 janvier 2004)
5 - Le chauffage domestique au bois (1 ^{er} avril 1995)	18 - Séchage du bois et énergie (9 mars 2002)	25 - Le bois énergie et l'environnement (12 juin 2004)
6 - Le bois énergie dans les Pays de la Loire... et à l'étranger (4 novembre 1995)	19 - Les petites chaufferies bois à alimentation automatique dans l'habitat et le tertiaire (31 août - 7 septembre 2002)	26 - Le bois énergie en Europe (18-25 septembre 2004)
7 - La valorisation des sous-produits du bois (3 février 1996)	20 - Une chaleur durable pour l'habitat et le tertiaire (21-28 décembre 2002)	27 - Bois d'industrie et bois énergie : concurrence ou complémentarité ? (5 février 2005)
8 - Approvisionnement des chaufferies (20 avril 1996)		28 - Le chauffage domestique au bois (27 août-3 septembre 2005)
9 - Plan bois énergie et développement local (2/9 mai 1998)		29 - 1996-2005 : le bois énergie double ses effectifs (8 octobre 2005)
10 - Cogénération et bois énergie (24/31 octobre 1998)		30 - Le bois énergie dans les serres maraîchères et horticoles (4 février)
11 - Le bois de feu dans les maisons individuelles (20 mars 1999)		
12 - Les réseaux de chaleur au bois (18 mars 2000)		
13 - Aspects du chauffage domestique au bois (15/22/29 juillet 2000)		

La cogénération bois en Europe

En septembre 2001, l'Union européenne a publié une directive (2001/77/CE) relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables, soit un objectif de 21% de la consommation brute d'électricité sur le territoire communautaire en 2010, chaque Etat membre ayant un objectif individuel. A titre d'exemple, le Danemark doit atteindre le seuil de production de 29% et la France celui de 21% (15% en 2004). Ces obligations ne seront pas tenues uniquement à partir de l'éolien ou de l'hydraulique et les Etats membres devront faire appel davantage à la biomasse, en particulier au bois.

1 - Une forte croissance de la production d'électricité à partir de bois

D'après EurObserv'ER, la consommation de bois pour l'énergie a été de 55,4 Mtep (1) en 2004 (Europe des 25), en augmentation de 5,6% par rapport à 2003. La production d'électricité à partir de bois quant à elle s'est établie à près de 35 TWh (2) et représente désormais 5,4% de la consommation de bois à usage énergétique.

La Finlande et la Suède sont les principaux pays producteurs d'électricité à partir de bois (45% du total pour 3% de la population européenne, grâce notamment à l'industrie papetière et à un nombre important de cogénérations sur réseaux de chaleur), suivies de l'Allemagne.

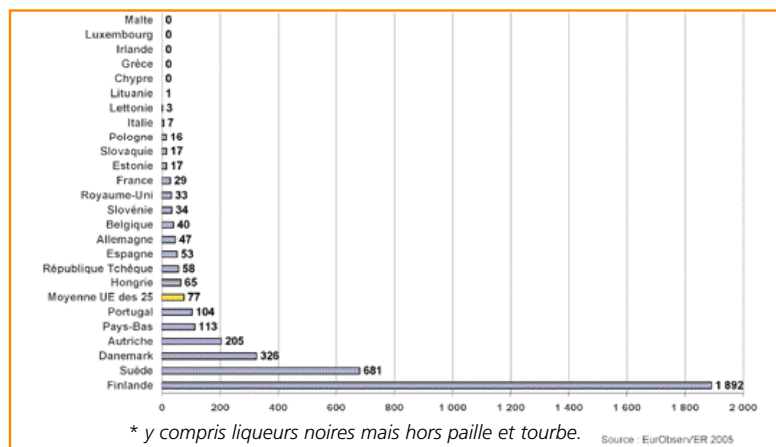
Les fortes croissances de production ont été observées récemment en Hongrie, Allemagne et Danemark, la France se situant au 16^e rang des pays de l'Union Européenne.

Si on considère l'importance démographique des pays, la Finlande, la Suède, le Danemark et l'Autriche, tous pays pionniers du bois énergie, sont en tête de classement.

2 - Des outils incitatifs variés pour développer l'électricité verte

La directive européenne de septembre 2001 laisse les Etats membres libres de recourir au mécanisme de soutien qu'ils préfèrent pour atteindre leurs objectifs. Dans l'Union européenne coexistent plusieurs régimes d'aide à l'électricité d'origine renouvelable : les tarifs d'achat bonifiés, les systèmes d'adjudication (appels d'offres), les certificats verts et les incitations fiscales. Ceux-ci peuvent être utilisés pour la production d'électricité à partir de bois et sont dans certains cas cumulables.

Dans la plupart des Etats membres, les compagnies achètent l'électricité verte aux producteurs à un prix supérieur au prix du marché de gros de l'électricité. Le surcoût est payé par la compagnie et répercuté sur les consommateurs (ou sur les contribuables dans le système de prise en charge par le Fonds de compensation des charges d'électricité), sous la forme d'une majoration du prix du kWh vendu au consommateur final. Ces systèmes présentent l'avan-



Production d'électricité à partir de bois en Europe (UE des 25) en 2004 (MWh pour 1.000 habitants)*.

tage d'offrir une certaine sécurité aux investisseurs et la possibilité d'un ajustement de l'offre en fonction de différents paramètres (choix de la cogénération, modulation en fonction des appels de puissance du réseau...). Toutefois, ils ne sont pas harmonisés au niveau de l'Union européenne. Au Danemark et partiellement en Espagne le gouvernement accorde un bonus écologique aux producteurs d'électricité renouvelable, ce qui majore le prix de vente de l'électricité. En Allemagne, la production d'électricité à partir de bois est favorisée, au-delà d'un tarif d'achat de base plus favorable qu'en France, par des primes apportées en fonction du type de biomasse (plaquettes forestières), de l'effi-

cacité énergétique (cogénération), de l'utilisation de techniques et procédures innovantes (gazéification du bois...).

Un système de certificats verts est en vigueur en Suède, au Royaume-Uni, en Italie, en Belgique et en Pologne. L'électricité renouvelable est vendue au prix du marché. Mais tous les consommateurs sont contraints d'acheter un certain nombre de certificats verts aux producteurs d'électricité renouvelables sur la base d'un pourcentage fixe (quota) de leur consommation d'électricité totale. Les certificats verts sont donc des instruments fondés sur le marché qui garantissent théoriquement la rentabilité de l'investissement.

	Puissance électrique (Mwé)							observations	évolution 2004/2003			
	< 0,15	< 0,5	< 1	< 2	< 3	< 5	< 10			> 10	< 12	< 20
Allemagne	115	99				89				84		=
Autriche (installations anciennes)	82,8 - 174,5		82,8 - 159,8		63,6 - 159,47,7 - 159,8					fourchette selon régions	=	
Autriche (installations nouvelles)			160	150	130	102					=	
Belgique (Wallonie)	110 = 20 (marché) + 90 (certificat vert)									à la hausse		
Belgique (Flandres)	128 = 20 (marché) + 108 (certificat vert)									à la hausse		
Danemark	40 (*)								tarif 2003, fixé 10 ans	=		
Espagne (origine forestière)	67,03 - 72,78									à la hausse		
Espagne (origine industrielle)	59,82 - 63,95									à la hausse		
Finlande	31 + crédit d'impôt (*)									?		
France	49 + 0 à 12 prime efficacité énergétique					Appel d'offres		AM 2002, garanti 15 ans	=			
Grande Bretagne	98 = 28 (marché) + 70 (certificat vert)									à la hausse		
Grèce (réseau interconnecté)	66 + 1,53 PF/KW. mois									à la hausse		
Grèce (réseau non interconnecté)	81,7									à la hausse		
Irlande	59,16									=		
Italie	119,4= 37 (marché) + 82,4 (certificat vert)									à la baisse		
Pays Bas	48 - 68 (*)									=		
Portugal	72,77									à la hausse		
Suède	53 = 30 + 23 (certificat vert ?) (*)									à la hausse		

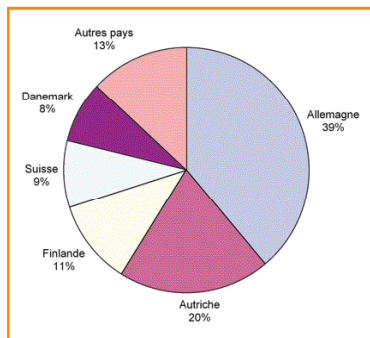
(*) ces pays ont de fortes écotaxes sur l'énergie primaire et/ou le carbone, et parfois sur l'électricité produite par les énergies fossiles (charbon et gaz cycle combiné), ce qui assure indirectement la compétitivité de l'électricité issue de la biomasse.

Prix de l'électricité produite à partir de bois (2004, en €/MWh)

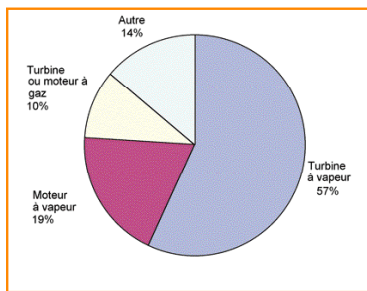
Dans le cadre d'une procédure d'adjudication, l'Etat fait des appels d'offres pour la fourniture d'électricité d'origine renouvelable, laquelle est ensuite achetée à la compagnie dans le cadre d'un contrat (sélection des candidats les mieux-disants). Le surcoût engendré est répercuté sur le consommateur. Si ces systèmes permettent, théoriquement, de limiter le surfinancement de la production d'origine renouvelable, leur caractère intermittent ne permet pas de créer les conditions d'un développement pérenne. La sous-estimation des prix dans certaines offres aboutit à l'abandon d'un nombre important de projets. Ce système n'est mis en œuvre qu'en France et en Irlande. Les incitations fiscales sont utilisées en Finlande et à Malte alors qu'elles sont un outil politique d'appoint pour Chypre, le Royaume-Uni et la République tchèque. Cette répartition en quatre groupes est grossière, certains pays combinant plusieurs systèmes. La Commission européenne encourage les Etats membres à exploiter les potentialités de la biomasse au travers de toutes les formes rentables de production d'électricité. La Commission souhaite que les dispositifs de soutien choisis favorisent la cogénération et non l'électrogénération seule. Cette dernière est en effet à éviter pour des raisons énergétiques (rendement global faible), économiques (coût de production élevé) et écologiques (gaspillage de quantités importantes de bois et risque d'exploitation minière sans préservation du caractère renouvelable de la ressource). Dans le contexte actuel de forte tension sur les marchés énergétiques et de remontée du prix du baril de pétrole, il paraît indispensable de favoriser le développement d'applications thermiques (vapeur de process, chaleur...) en substitution d'énergies fossiles importées (fioul lourd, fioul domestique, gaz naturel).

3 - Des unités de cogénération bois principalement en process vapeur et de taille modeste

Une étude de l'Institut autrichien Joanneum Research (réalisée dans le cadre du projet européen Biocogen) a recensé 122 unités de cogénération à partir du bois en Europe,



Localisation des unités de cogénération étudiées par le Joanneum Research.



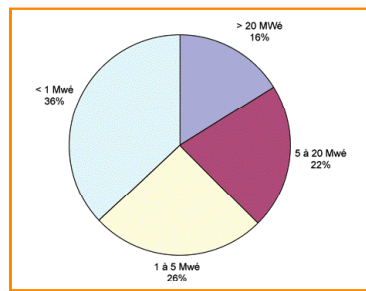
Technologies des unités de cogénération étudiées par le Joanneum Research.

essentiellement dans les pays germanophones, en Scandinavie et au Danemark. Les process vapeur (turbine ou moteur) représentent plus des trois quarts des installations. Les autres technologies (moteur Stirling, cycle organique de Rankine, moteur et turbine à gaz) en sont au stade de la démonstration ou de la recherche/développement.

Les centrales consomment principalement des plaquettes forestières et de scieries, des déchets de l'industrie du bois (écorces) et diverses biomasses urbaines ou agricoles.

Les puissances électriques s'étagent dans une gamme de quelques centaines de kWé à 20 MWé et plus.

Pour les centrales vapeur, à l'exception des unités de plus de 30 MWé, le rendement électrique est médiocre (compris entre 15 et 20%) ; celui-ci est un peu plus élevé pour l'option gazéification (20 à



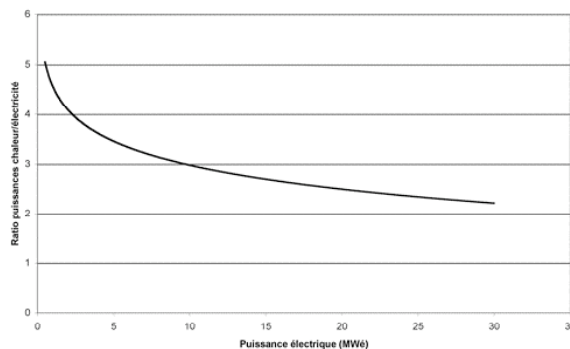
Puissance des unités de cogénération étudiées par le Joanneum Research.

30%). Plus la puissance est faible, plus le ratio chaleur/électricité est élevé : dans la gamme de moins de 10 MWé, la production de chaleur est trois à cinq fois plus importante que la fourniture d'électricité ; ce ratio est moins défavorable à l'électricité pour les installations de gazéification (2 à 2,5 fois plus de chaleur que d'électricité).

Les coûts d'investissements, ramenés au kWé installé, varient beaucoup d'une installation à l'autre. Pour les installations de moins de 10 MWé, ils se situent dans une fourchette de 3.000 à 5.000 €/kWé. Ces chiffres concernent la technologie chaudière/turbine à vapeur, mais ne sont évidemment pas représentatifs des autres solutions, encore au stade de la démonstration ou de la recherche/développement.

(1) tep : tonne équivalent pétrole (1 tep vaut 11,63 MWh).
(2) 1 TWh = 1.000.000 MWh.

Ratio des puissances thermique et électrique des unités de cogénération bois.



Les technologies de production d'électricité à partir de bois

On peut distinguer deux grandes filières de production d'électricité à partir de bois :

- la combustion externe avec production de vapeur et injection dans une machine à vapeur ;
- la gazéification avec injection des gaz de pyrolyse dans une turbine ou un moteur à gaz pauvre.

COMBUSTION EXTERNE

La filière combustion est à ce jour la mieux éprouvée car utilisée de longue date, notamment dans l'industrie papetière.

Un générateur thermique (chaudière à vapeur) fournit de l'énergie thermique à un fluide de travail (eau à l'état vapeur, éventuellement fluide thermique ou air) qui est injecté dans un organe de conversion énergie thermique / énergie mécanique permettant la mise en rotation d'un arbre ; celui-ci assure à son tour la rotation de l'alternateur, organe de conversion énergie mécanique / énergie électrique.

Plusieurs machines thermiques peuvent être envisagées :

Les turbines à vapeur sont le système le plus utilisé pour la cogénération vapeur à

partir de biomasse. Elles permettent simultanément la production d'électricité et la fourniture d'énergie thermique à un process industriel ou un réseau de chaleur. On distingue deux types de turbines : **Les turbines à contrepression.** La pression de vapeur en sortie de turbine est au minimum de 3 à 5 bars mais peut également être plus élevée (10 à 15 bars) en fonction des besoins en aval de la turbine (process industriel, réseau de chaleur...). La gamme de puissance est très étendue (de 100 kWé à plusieurs MWé) et le coût d'investissement au kWé est le moins élevé des machines thermiques à vapeur. Le rendement électrique reste cependant faible : 10 à 15% en dessous de 5 MWé, 15 à 20% au-delà.

Les turbines à condensation. La pression de sortie de la vapeur peut descendre jusqu'à 40 millibars, ce qui fait apparaître des condensats dans la turbine. Cette fraction liquide doit être extraite par des purges. En sortie de turbine, la température est basse et l'énergie thermique résiduelle, qui est importante puisqu'elle représente environ 60% de l'énergie fournie à la chaudière par le combustible, ne peut être récupérée que si l'on dispose d'une source froide en quantité suffisante : chauffage basse température, préchauffage d'eau chaude sanitaire, préchauffage de vapeur process... Envisageables dès 500 kWé, les turbines à condensation ont un rendement électrique allant de 15-20% en dessous de 2 MWé à 20-25% au-delà.

Il peut être intéressant de n'amener à très basse pression qu'une partie de la vapeur, l'autre étant soutirée à des pressions et températures plus élevées permettant sa valorisation thermique. Il faut alors combiner les deux types de turbines ou effectuer un soutirage entre deux étages de la turbine.

Le moteur à vapeur est un moteur alternatif à combustion externe. C'est le mouvement vertical des deux pistons actionnés par le flux de vapeur, qui permet, par le biais d'un arbre à came et d'un vilebrequin, de faire tourner l'arbre relié à l'alternateur. La gamme de puissance s'étend de 120 à 1.500 kWé et le rendement électrique varie de 15 à 20%.

Le cycle organique de Rankine ressemble beaucoup au cycle de vapeur classique, mais présente la particularité de comporter deux circuits de fluides : un fluide de travail (généralement à base de silicone) et un fluide caloporteur pour vaporiser le fluide de travail (huile thermique haute température). La gamme de puissance s'étend de 300 à 1.000 kWé et le rendement électrique varie de 16 à 17%.

Le moteur Stirling est un moteur alternatif à combustion externe à gaz chaud. A la différence du moteur à combustion interne, le piston n'est pas mis en mouvement par une explosion, mais par la détente d'un gaz pur en cycle fermé, mis

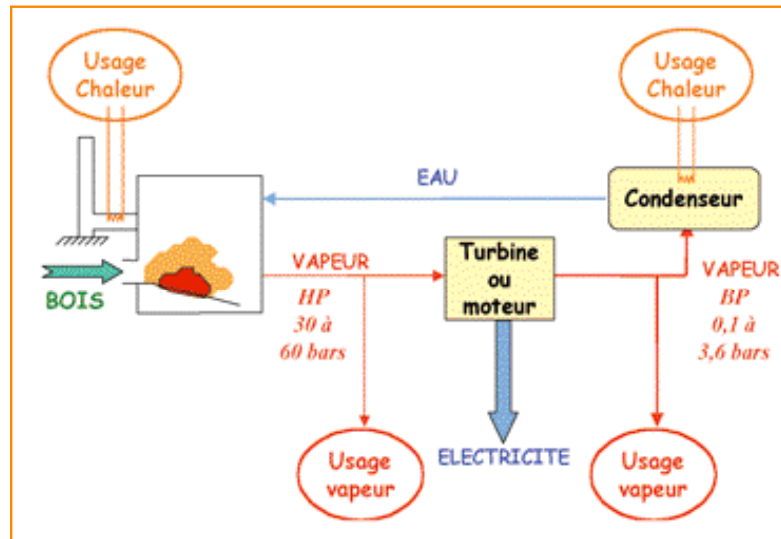


Schéma de principe de la combustion externe.

successivement au contact d'une source froide (air ambiant, eau d'alimentation ou eau de retour d'un réseau de chauffage...) et d'une source chaude (gaz d'échappement de la chaudière bois, fluide intermédiaire chauffé par la chaudière bois). La gamme de puissance s'étend de 1 kWé à 350 kWé et le rendement électrique varie de 20 à 30%.

GAZÉIFICATION

Le but de la gazéification est de transformer des combustibles solides en un combustible gazeux homogène comprenant 30 à 80% de H₂ et CO (gaz pauvre), ouvrant des perspectives intéressantes pour la production d'électricité.

La filière est toutefois en cours de développement : si on compte quelques fabricants européens (et notamment français) de gazogènes associés à des moteurs à gaz de quelques centaines de kWé, le nombre d'installations reste extrêmement limité en Europe. Plusieurs programmes internationaux visent au développement de centrales de forte puissance (plusieurs MWé) avec cycles combinés, dont les performances pourraient être comparables à celles des centrales au gaz naturel (40 à 45% de rendement électrique). Si nombre de centres de recherches et d'institutions européennes mettent beaucoup d'espoir et de moyens pour le développement de cette technologie, les seules installations en fonctionnement connaissent d'importants retards dans leur montée en puissance, liés notamment aux problèmes de gazéification elle-même (combustion en défaut d'air) et surtout d'épuration des gaz avant injection dans la turbine.

Divers procédés sont envisageables pour gazéifier du bois :

Les réacteurs à lit fixe sont de deux types :

- à contre courant : le combustible est introduit par la partie supérieure et

l'agent oxydant (air, air enrichi en oxygène, oxygène) par le bas. Le gaz, évacué près de la zone de pyrolyse du bois, présente une teneur en goudrons importante. Ce procédé peut être utilisé avec des combustibles humides et est relativement peu sensible à leur granulométrie. Il n'y a, en théorie, pas de limitation de puissance pour ce type de réacteur. Il n'existe toutefois aucune installation de forte puissance et toutes les applications industrielles connues sont thermiques.

- A co-courant : le bois et l'agent oxydant se déplacent dans le même sens. Le gaz produit est évacué du réacteur près de la zone la plus chaude, induisant une concentration en goudrons moindre que dans le cas précédent. Le combustible utilisé doit être sec (environ 15% d'humidité), de granulométrie bien précise (quelques cm³) et exempt de poussières. Intéressantes pour la production d'électricité avec un moteur thermique, les installations de ce type sont toutefois limitées en puissance (350 kWé).

Les réacteurs à lit fluidisé sont de trois types : dense, circulant ou entraîné. Ils ont en commun de nécessiter un combustible sec (moins de 20% d'humidité) et de granulométrie précise (2 à 5 mm).

Production d'électricité

Plusieurs modes de production d'électricité sont disponibles :

La combustion directe : le gaz est brûlé dans une chaudière produisant de la vapeur haute pression, valorisée ensuite comme dans la filière combustion externe. Cette solution est expérimentée pour la co-combustion en centrale à charbon.

Les moteurs à combustion interne : moteurs diesel "dualfuel", la gamme de puissance allant de 100 kWé à plusieurs MWé avec un rendement de 80% par rapport au gazole ; moteurs à gaz, disponibles dans la même gamme de puissance.

Les turbines à gaz, associées à un cycle à vapeur : l'énergie résiduelle contenue dans les gaz d'échappement de la turbine à gaz est récupérée dans un échangeur et utilisée dans une turbine à vapeur. Grâce à la combinaison de ces deux étages de production d'électricité, le rendement électrique escompté est proche de 40% (gazéification à pression atmosphérique), voire 45% (gazéification sous pression).

Les moteurs sont moins exigeants que les turbines en termes de qualité de gaz et sont plus performants que les turbines à gaz simples. En revanche, les solutions en cycle combiné (IGCC) sont plus compétitives mais plus complexes.

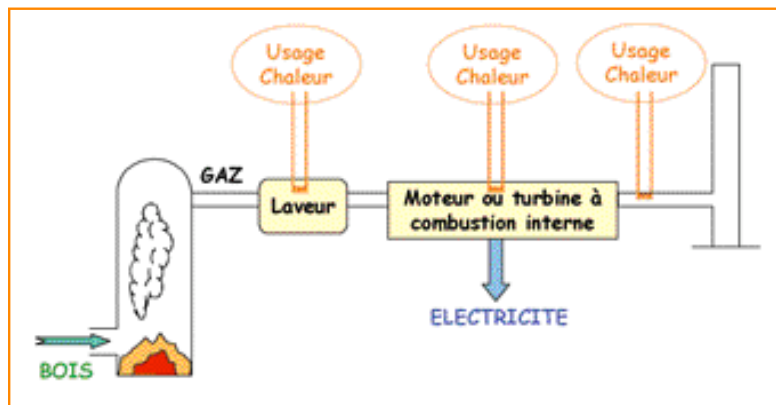


Schéma de principe de la gazéification.

La production d'électricité à partir de bois en France

La production d'électricité à partir de bois en France s'élevait à 1,74 TWh en 2004, en très légère progression par rapport à 2003 (source Eurobserv'ER). Elle est très majoritairement (plus de 95%) le fruit d'une douzaine d'installations de cogénération de forte puissance dans les papeteries, qui valorisent notamment les sous-produits de leur activité (écorces, liqueurs noires). Cette production est quasi totalement autoconsommée. La seule installation dans le secteur habitat/tertiaire est l'unité de cogénération de Felletin (Creuse, 3 MWé).

Pour développer l'électricité produite à partir de biomasse, les pouvoirs publics ont choisi de mettre en place deux systèmes d'aide financière : des appels d'offres et un tarif d'achat.

LES APPELS D'OFFRES

En 2004, le ministère de l'Industrie a lancé un appel d'offres, piloté par la Commission de régulation de l'énergie (CRE), pour la création de centrales électriques d'une puissance supérieure à 12 MWé. Les résultats ont été présentés en janvier 2005 : 14 projets bois retenus pour une puissance totale installée de 216 MWé, une consommation de bois de l'ordre de 1,4 million de tonnes (en plus des 1,5 million de tonnes de liqueurs noires, boues papetières et marc de raisin) et un prix moyen de vente de l'électricité de 86 €/MWh. Cinq d'entre eux concernent l'industrie de la pâte à papier (78 MWé). Six autres ont été attribués à une société qui entend développer la technologie de la gazéification, dont la maturité industrielle pour des fortes puissances reste à démontrer.

La concentration des projets dans le Limousin et les Vosges risque de bouleverser les marchés des bois d'industrie et du bois énergie locaux. Un processus de concertation à l'échelle des régions, réu-

nissant les acteurs concernés, a été mis en place pour maîtriser les risques d'impacts négatifs de ces projets sur l'approvisionnement papetier et panneautier et sur celui des chaufferies collectives existantes.

En 2006, l'Etat va lancer un nouvel appel d'offres pour une puissance totale de 300 MWé. Il concernera principalement des installations de production d'électricité de puissance unitaire supérieure à 9 MWé (seuls 60 MWé devraient être réservés pour des installations de puissance comprise entre 5 et 9 MWé).

LE TARIF D'ACHAT

Pour les installations de puissance inférieure à 12 MWé, l'achat d'électricité est régi par l'arrêté du 16 avril 2002 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant à titre principal l'énergie dégagée par la combustion de matières non fossiles d'origine végétale. Les contrats d'achat ont une durée de 15 ans et les tarifs sont fondés sur le respect d'une puissance garantie avec une disponibilité optimale à 85%. Au choix du producteur, cette garantie peut porter sur toute l'année ou seulement sur la période hivernale (du 1^{er} novembre au 31 mars en métropole continentale et du 1^{er} novembre au 1^{er} mars en Corse). Selon le taux de valorisation de l'énergie produite, le prix d'achat de l'électricité se situe entre 49 et 61 €/MWhé. Depuis la

publication de ces tarifs, aucune installation de production d'électricité à partir de bois n'a été construite, ce qui montre qu'ils sont beaucoup trop faibles pour permettre la rentabilité d'une installation de petite ou moyenne puissance électrique.

La loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique (loi POPE) du 13 juillet 2005 prévoit la révision des tarifs d'achat de l'électricité, qui devrait avoir lieu dans le courant du premier semestre 2006. Cette révision est très attendue pour permettre le développement de la production d'électricité dans la gamme de puissance de 1 à 5 MWé, plage dans laquelle se situe la quasi totalité des applications de cogénération bois dans l'industrie (à l'exception du cas particulier des papeteries) et dans les réseaux de chaleur :

- d'une part parce que la puissance thermique appelée en base (environ 40% de la puissance crête dans un réseau de chaleur) est 3 à 4 fois plus importante que la puissance électrique "installable" ;
- d'autre part parce que les grosses entreprises et réseaux de chaleur consommant de la vapeur de process ou de la chaleur (plus de 20 MW de puissance thermique appelée) sont pour la plupart déjà équipés de cogénération gaz (turbine, moteur...) ou font appel à une base existante (récupération de chaleur fatale, incinération d'ordures ménagères...).

Production d'électricité dans une scierie à Renko (Finlande)

Le groupe finlandais Finnforest est le leader européen de l'industrie du bois avec 1,9 milliard d'euros de chiffre d'affaires et 7.600 employés. La société, spécialisée dans la transformation mécanique du bois, est présente dans 21 pays.

A la scierie de Renko, une centrale électrique au bois de 1,3 MWé / 8 MWth et une unité supplémentaire fioul/gaz de 5 MWth ont été fournies et installées par la société Wärtsilä. La technologie est basée sur un cycle vapeur (turbine à contrepres-

Nom : Scierie Finnforest de Renko
Type : Cogénération
Lieu : Renko, Finlande
Propriétaire : Biokraft Oy, Finlande
Mise en service début 2004
Puissance électrique 1,3 MWé
Puissance thermique 8 MWth + 5 MWth fioul/gaz

(Cette fiche a été réalisée à partir d'informations fournies par Wärtsilä)

sion) produisant de l'électricité et de la chaleur. La chaudière d'appoint au fioul/gaz complète la fourniture de chaleur lors des pics d'appels de puissance. Toute la production d'électricité (7 GWthé) est consommée par la scierie, ce qui représente environ la moitié des besoins sur l'année. Environ 48 GWth de chaleur sont utilisés pour le séchage du bois.

La technologie de combustion est basée sur une grille rotative spécialement adaptée aux combustibles très humides (écorces et sciures).

La scierie est autosuffisante en combustible bois dont l'humidité varie entre 50 et 65% (sur masse brute). Grâce à un système par automate performant, l'installation est pratiquement autonome. Le personnel est présent durant les jours ouvrables et le suivi est effectué à distance à partir du centre de contrôle "Fortum Energy" situé à 200 km de Renko.

Cette option permet d'économiser environ 5.900 tonnes de fioul lourd et évite l'émission de 18.500 tonnes de CO₂. Avec le bois comme combustible, les rejets de soufre sont négligeables. Les poussières sont piégées dans un électrofiltre et les rejets sont conformes à la sévère réglementation finlandaise.

LA GRILLE ROTATIVE, TECHNOLOGIE INNOVANTE

Les installations équipées d'un foyer à grille rotative acceptent des combustibles dont le taux d'humidité peut atteindre 65% sur brut. Le bois est introduit dans le foyer par le centre d'une grille de forme conique. Cette dernière est composée d'anneaux concentriques, alternativement en rotation ou stationnaires, ce qui permet une répartition homogène du combustible sur l'ensemble de la grille. Les différentes phases de la combustion (séchage du combustible, pyrolyse/gazéification, oxydation des gaz



Grille rotative (source Wärtsilä).

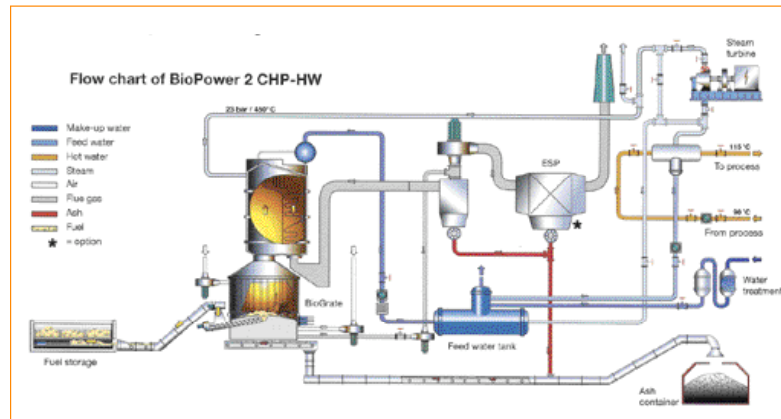


Schéma de principe de l'installation de Renko (source Wärtsilä).

et combustion des résidus carbonneux) se réalisent au fur et à mesure de la progression du combustible vers le bord de la grille, où les cendres tombent dans un bac rempli d'eau pour les refroidir.

La bonne gestion de l'air de combustion permet d'obtenir un rendement élevé (85-90%) et de faibles rejets atmosphériques. L'air primaire (ainsi que les fumées recyclées pour certains modèles) est introduit

sous la grille et pénètre dans le foyer grâce à de petites fentes situées sur les anneaux concentriques. L'air secondaire (et éventuellement l'air tertiaire) est injecté au-dessus de la grille, directement dans la flamme. La distribution de l'air est contrôlée par des registres et des ventilateurs à vitesse variable qui garantissent de faibles émissions de NO_x et de CO pour une large gamme de combustibles biomasse.

Production d'électricité sur un réseau de chaleur basse température à Assens (Danemark)

Mise à feu en 1999, l'unité de cogénération bois d'Assens couvre les besoins de chauffage domestiques, tertiaires et industriels de la majeure partie de la ville. Elle est d'ailleurs la propriété d'environ 2.360 consommateurs regroupés au sein d'une société coopérative.

D'une puissance de 4,7 MWé et 12,0 MWth (vapeur à 77 bar et 525°C), l'installation est équipée d'une condensation des fumées permettant de récupérer 2,8 MWth supplémentaires, ce qui n'est possible que parce que le réseau de distribution est à basse température (voir plus loin : "Condensation des fumées et récupération d'énergie"). Le rendement global est de 94% avec le condenseur (80% sans) et le rendement électrique de 23%.

La consommation en combustible bois est d'environ 45.000 t/an. L'organisation de l'approvisionnement est donc très importante : autour de l'installation ont été construites des plates-formes de stockage louées à 5-6 fournisseurs qui peuvent ame-

ner les billons directement depuis le port tout proche et faire venir des broyeurs de forte puissance quand un stock de 2.000 à 3.000 t est constitué. Des plaquettes forestières et des produits connexes de scierie/menuiserie complètent ce dispositif. L'exploitation de l'unité de cogénération nécessite la présence de trois personnes en journée et est totalement automatisée pendant la nuit.

Deux systèmes d'aides permettent de couvrir le surcoût lié à la production d'électricité et d'obtenir un prix de vente de la chaleur identique à celui qui aurait été observé s'il n'y avait eu que de la production de chaleur :

- des subventions à l'investissement (20%) ;
- un prix d'achat garanti de l'électricité (80 €/MWhé sur 15 ans).

Ce prix d'achat est conforme aux simulations effectuées en France avec un taux de subventions de 20% (qui correspond à 50% de l'investissement d'une installation produisant uniquement de la chaleur).

Principaux paramètres économiques

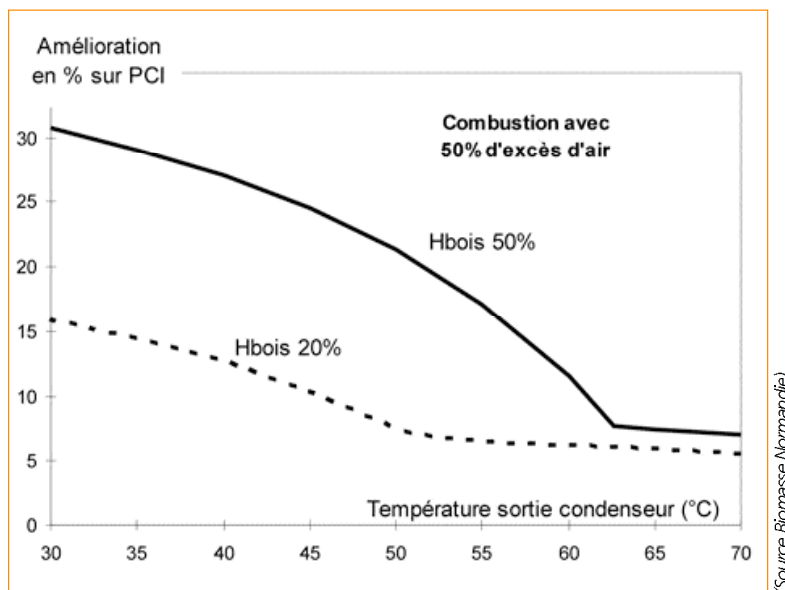
Coûts d'investissement total	17 millions d'€
Investissement/ kWé	3.600 €
Subventions	3,4 millions d'€ (20%)
Coûts d'exploitation (non compris combustible bois)	200.000 €
Prix de vente de l'électricité verte	80 €/MWhé

(Cette fiche a été réalisée à partir d'informations recueillies sur Internet et fournies par Assens Fjernvarme et Force Technology).

CONDENSATION DES FUMÉES ET RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

Intérêt

La condensation pour des installations brûlant de la biomasse est développée depuis la fin des années 80 dans plusieurs pays européens, en particulier au Danemark. Cette technologie est particulièrement intéressante dans le cas du bois, lequel est constitué en partie d'hydrogène qui forme de l'eau lors de la combustion et qui contient de surcroît une forte proportion d'eau à l'état liquide : 20 à 60% de sa masse selon son origine. Les fumées émises par la combustion du bois ont donc des teneurs en vapeur d'eau élevées, dont la formation a nécessité une importante consommation d'énergie. L'intérêt de la condensation est de récupérer, dans un échangeur adapté, une partie de cette chaleur latente contenue dans la vapeur d'eau, en abaissant la température des fumées en dessous du point de rosée humide (entre 50 à 70°C, en fonction de l'humidité du bois et de l'excès d'air). Pour un bois à 50% d'humidité, brûlé dans une chaudière performante avec 50% d'excès d'air, la condensation des fumées peut faire gagner 10 à 20 points de rendement. Plus le bois est humide, plus l'amélioration du rendement est sensible.



Amélioration du rendement grâce à la condensation.

Autre avantage de l'utilisation d'un condenseur : son effet filtrant permet de réduire considérablement les émissions de particules.

Pour obtenir une condensation efficace des fumées issues de la combustion, il est nécessaire de disposer, au niveau de l'échangeur, d'un fluide dont la température est inférieure à celle du point de rosée

humide des fumées. Ce fluide est appelé source froide. La configuration la plus simple est celle d'un réseau de chaleur basse température ayant des retours inférieurs à 50°C : le fluide caloporteur passe dans l'échangeur à condensation et refroidit les fumées ; il est donc légèrement réchauffé avant d'être réintroduit dans la chaudière.

Cogénération bois à Vilnius (Lituanie)

Vilnius, capitale de la Lituanie compte 600.000 habitants. La ville est alimentée en énergie par des centrales de cogénération et un réseau de chaleur de 580 km de long qui dessert 90% de la population, les administrations, le tertiaire... Les puissances installées sont de 5.131 MWth et 3.628 MWé et les productions d'énergie respectivement de 2.498 TWhth et 1.084 TWhé.

En 2002, la municipalité de Vilnius a concédé pour 15 ans l'exploitation de la centrale et du réseau de chaleur à Vilniaus Energija, filiale de Dalkia International.

La Lituanie est engagée dans un programme de création de chaufferies et de réseaux de chaleur au bois avec l'appui du Fonds français pour l'environnement mondial (FFEM). Vilniaus Energija s'est engagée dans la transformation d'une chaufferie et convertit une chaudière au bois (60 MWth et 12 MWé), en réutilisant certains équipements en place (générateur de vapeur, turbine à contre-pression...). Bien que le projet de Vilnius ne soit pas financé par le FFEM, il fait partie de la stratégie globale de développement des biocombustibles dans la région.

Le concessionnaire en charge du projet a retenu un assistant finlandais pour l'accompagner dans la réalisation (Enprima) qui a confirmé que la technolo-

gie du lit fluidisé pour brûler de la biomasse était bien adaptée d'un point de vue technico-économique.

Après les phases d'études de faisabilité, d'évaluation des impacts environnementaux et d'études techniques, les marchés de travaux ont été passés avec des entreprises finlandaise (Kvaerner Power) pour la restructuration de la chaudière, allemande pour l'électrofiltre et lituanienne pour le génie civil et les autres lots techniques.

Parallèlement, des négociations ont été entreprises avec la société Aviridis pour la

fourniture du biocombustible (contrat à long terme). Le but est de sécuriser l'approvisionnement pour produire environ 450 GWh de vapeur destinée à fabriquer l'électricité et la chaleur. Aviridis s'apprête à fournir un combustible composé de 70% de biomasse forestière et agricole (paille) et de 30% de tourbe (seuil maximum acceptable en Lituanie pour que le combustible soit considéré comme "vert").

L'installation est en construction et doit être mise en service au 3^e trimestre 2006.

Projet de cogénération au bois en cours

Réfection d'une chaudière existante et conversion au bois (lit fluidisé)
 Puissance bois installée : 60 MWth + 12 MWé
 Production de chaleur à partir du bois : 400 GWhth
 Production d'électricité à partir du bois : 65 GWhé
 Consommation de déchets de bois estimée : 170.000 m³ (150.000 tonnes de bois)
 Caractéristiques des déchets de bois : taux d'humidité = 40 à 50%
 PCI = 2,5 MWh/tonne,
 Economies de combustible fossile : moins 10% de gaz naturel
 Réductions de CO₂ : 90.000 tonnes CO₂/an
 Création d'emplois : 10 (au minimum).

Montant de l'investissement total estimé :	9,5 M€
dont : • Réfection chaudière vapeur	39%
• Génie civil alimentation automatique	25%
• Equipements annexes/automatismes, électrofiltre	29%
• Ingénierie	7%

(Cette fiche a été réalisée à partir d'informations recueillies auprès de Dalkia et ICE)

Une centrale de cogénération à partir de la gazéification du bois à Güssing (Autriche)

En Autriche, une première unité de cogénération électricité/chaaleur à partir d'un procédé de gazéification de déchets de bois a été mise en place en 2002 à Güssing. Le gazogène a été développé par l'Institut d'Ingénierie Chimique (Université Technique de Vienne) et AE Energietechnik. Le process consiste à produire, dans un double lit fluidisé, de la chaleur et des gaz pauvres ($H_2 + CO...$). Les gaz refroidis et lavés sont injectés dans un moteur à gaz pour être transformés en électricité et en chaleur. La puissance de l'installation est de 2 MWé et de 4 MWth. Le rendement global est de 81% (25% d'électricité et 56% de chaleur ; rapport électricité/chaaleur = 0,44).

TECHNOLOGIE INNOVANTE

Les plaquettes forestières sont déversées dans une trémie, introduites dans le gazogène par deux vis sans fin en cascade, l'étanchéité étant assurée par deux écluses rotatives. La chambre de gazéification est fluidisée avec de la vapeur issue de la chaudière, ce qui évite l'introduction d'azote. La chambre de combustion est fluidisée avec de l'air et fournit la chaleur au process de gazéification (réaction endothermique), via le recyclage du matériau du lit (lit fluidisé circulant).

Atouts de cette technique :

- compacité de l'unité ;
- utilisation de vapeur, ce qui génère peu d'azote et un faible taux de goudrons ;
- équilibre entre gazéification et combustion (le fonctionnement de l'installation est stable sans régulation ni réglages excessifs).

Le gaz produit est refroidi et épuré dans un système à plusieurs étages : dans un premier temps, un échangeur abaisse la température de 850-900°C à 160-180°C ; le premier étage d'épuration est un filtre à manche textile qui capte les particules et une partie des goudrons (réintroduits dans la chambre de combustion) ; dans un deuxième étage, les gaz sont débarrassés des goudrons et les condensats chargés (lavage) vaporisés et réinjectés dans la zone de combustion. Le laveur abaisse la température des gaz autour de 40°C, ce qui est nécessaire avant injection dans le moteur. Le gaz épuré (pouvoir calorifique = 3,3 kWh/Nm³ sec) produit de l'électricité et de la chaleur et est brûlé dans la chaudière lorsque le moteur est à l'arrêt.

Les produits de combustion sont oxydés dans un catalyseur ce qui abat fortement le taux de monoxyde de carbone. Les gaz d'échappement du moteur sont utilisés pour le chauffage urbain et les fumées de la chaudière pour préchauffer l'air com-



(photo R. Rauch)

L'unité de gazéification de Güssing.

burant et réchauffer la vapeur de process et la chaleur livrée au réseau. En amont de la cheminée, un filtre à particules complète le dispositif d'épuration des rejets gazeux.

APPROVISIONNEMENT EN COMBUSTIBLE ET RÉSULTATS DE LA DÉMONSTRATION

L'approvisionnement en plaquettes forestières (taux d'humidité autour de 25%) est sécurisé par contrat à long terme avec une association d'agriculteurs. Le prix d'achat a été fixé pour 10 ans à 16 €/MWh PCI (avec clause d'indexation). A l'avenir, il est prévu que 40% du combustible bois sera constitué par les résidus des entreprises locales du bois (7 €/MWh).

La chaleur alimente un réseau de 20 km de long desservant 300 maisons, des bâtiments publics, des écoles, un hôpital... et dans le futur des séchoirs à bois. L'électricité est vendue à la compagnie de distribution 160 €/MWhé.

Après une phase d'optimisation, le process de gazéification et d'épuration/lavage des gaz est désormais stable et ne connaît pas de problème majeur. Le faible écart de

température entre les chambres de combustion et de gazéification montre que la circulation du lit de matériaux entre ces deux zones s'effectue correctement.

L'installation de Güssing est économiquement opérationnelle dans le contexte autrichien. Malgré des coûts d'approvisionnement en combustible bois élevés, l'équilibre économique de la cogénération est atteint grâce à un tarif d'achat de l'électricité verte très élevé.

A l'avenir, 25% de réduction des coûts d'investissement sont escomptés grâce au retour d'expérience de cette opération ; de même les coûts d'exploitation devraient également baisser. Cette technologie est toutefois encore en phase de développement et ses promoteurs n'en assurent pas la commercialisation industrielle dans d'autres pays européens ; ceux-ci souhaitent encore valider certaines phases du process qui ne leur donnent pas encore totale satisfaction. ■

Principaux paramètres économiques

Coûts d'investissement total	10 millions d'€
Investissement/ kWé	5.000 €
Subventions	6 millions d'€ (60%)
Coûts d'exploitation (y compris combustible bois)	10 à 15% des investissements
Prix chaleur sortie chaudière	20 €/MWth
Prix chaleur rendue usagers	39 €/MWth
Prix de vente de l'électricité verte	160 €/MWhé

(Cette fiche a été réalisée à partir d'informations recueillies sur Internet et fournies par Austrian Energy Agency et IEA Bioenergy)