

Produire de l'électricité à partir du bois sans en gaspiller une miette



Lorsque l'on produit de l'électricité à partir de la voie thermique, avec une chaudière, une turbine ou un moteur, et avec quelque source d'énergie que ce soit, le processus ne génère qu'une relativement faible partie d'électricité pour une partie importante de chaleur.

La plupart du temps, les dispositifs de production d'électricité ne récupèrent pas cette chaleur. Et ce sont des milliards de MWh thermiques qui sont ainsi perdus chaque année, un gaspillage fabuleux !

Pourtant depuis des décennies, il existe des solutions rationnelles, pour ramener ces pertes de 75 à seulement 20 % : **c'est la cogénération.**

A chaque fois que l'on va produire de l'électricité, on va valoriser la chaleur, ou en tout cas la plus grande partie de celle-ci, pour chauffer des bâtiments, sécher des produits ou alimenter des procédés industriels. Bien entendu, il n'est pas simple de trouver à chaque fois un débouché pour cette chaleur, d'autant que le modèle de production dominant a développé des unités gigantesques. Dans la pratique, on va donc plutôt faire l'inverse : à chaque fois que l'on va produire de la chaleur, on va essayer de produire en même temps de l'électricité, ainsi l'efficacité globale sera toujours bonne.

Comparaison des rendements pratiques des principales filières de production d'électricité

Systèmes	Turbine vapeur charbon, fioul lourd, nucléaire	Turbine gaz	Cycle combiné	Cogénération gaz	Cogénération bois
Rendement électrique	25	30	40	30	10 à 30
Rendement global	25	30	40	65 à 85	65 à 85
Pertes	75	70	65	15 à 35	15 à 35

Ce concept d'utilisation rationnelle de l'énergie est donc très intéressant en lui-même, mais on peut le rendre plus intéressant encore en l'alimentant avec une source d'énergie renouvelable, le bois ou la biomasse en générale, que l'on va pouvoir ainsi consommer sans la gaspiller.

Jusqu'à il y a encore une vingtaine d'années, la cogénération utilisant le bois ou la biomasse n'avait été développée dans le Monde que chez les industriels disposant de leur propre biomasse résiduelle. Avec la raréfaction des sources d'approvisionnement fossiles et la prise de conscience écologique, de plus en plus de collectivités, notamment en Europe du Nord mettent en œuvre ce principe sur des réseaux de chauffage urbains.

Il existe deux grandes filières de cogénération à partir de la biomasse :

- La filière de combustion dans laquelle le combustible est utilisé directement.
- La filière de gazéification par laquelle la biomasse est transformée en gaz avant d'être brûlée.

La filière combustion

Les procédés de cette filière nécessitent, en amont, la production de vapeur. Une chaudière biomasse classique produit et fournit de la vapeur surchauffée en aval à l'installation de production d'électricité.

La turbine à vapeur (à condensation ou à contre-pression)

La cogénération avec turbine à vapeur est la technologie la plus utilisée actuellement. C'est également la technologie la plus éprouvée. Pour les puissances supérieures à 1 MWe, cette technologie est compétitive puisque les matériels sont standardisés quelque soit la source d'énergie, les installations au bois utilisant les mêmes technologies que les autres combustibles, la différence technologique s'arrêtant à la chaudière.



Le principe général consiste à utiliser de la vapeur haute pression, entre 40 et 50 bars et 400 à 500°C, produite au niveau de la chaudière pour entraîner la turbine. La vapeur est détendue dans une turbine couplée à un alternateur qui assure la production électrique. La vapeur est par la suite condensée en cédant sa chaleur à une source froide – l'eau du réseau de chaleur - puis renvoyée dans la chaudière par l'intermédiaire d'une pompe.

Il existe deux types de turbines à vapeur :

Les turbines à condensation

Dans ce type de turbines, la vapeur est détendue au maximum ; sa pression à l'entrée du condenseur peut atteindre quelques mbar. Le rendement électrique peut atteindre jusque 25-30 % mais à ce niveau, la valorisation de la chaleur à température assez basse est difficile et le rendement global de l'installation

est alors faible. Dans le cas où l'on ne peut pas récupérer de chaleur au niveau du condenseur parce que la source froide (réseau de chaleur) n'est pas à un niveau de température assez faible, on se trouve dans un schéma de production d'électricité uniquement et non de cogénération.

Les turbines à contre pression

Elles sont essentiellement utilisées dans les cas où il existe un besoin en vapeur. La vapeur est détendue dans la turbine jusqu'à une pression supérieure à la pression atmosphérique ce qui permet de la garder dans sa phase gazeuse. La vapeur détendue peut alors être valorisée pour un procédé industriel, une blanchisserie ou dans un réseau de chaleur. Le rendement électrique d'une telle turbine est plus faible (maximum 15 à 20 %) que celui d'une turbine à condensation mais la chaleur résiduelle constitue dans ce procédé un élément important valorisable. Le rendement global de l'installation en prenant en compte l'énergie consommée et l'énergie utile (électricité et chaleur) est meilleur.

Il est possible de coupler les deux types de turbines pour obtenir un rendement électrique correct et permettre une valorisation de la chaleur : la vapeur est détendue dans une turbine à contre-pression puis dans une turbine à condensation avec possibilité d'utiliser une partie de la vapeur en sortie de la première turbine. Un tel couplage peut apporter une souplesse dans l'exploitation. En effet, lorsque la demande en vapeur sur le réseau (procédé industriel ou réseau de chaleur) est importante, alors la vapeur à la sortie de la première turbine est en majeure partie utilisée pour le procédé. En revanche, lorsque ces besoins diminuent, la vapeur est détendue dans la turbine à condensation pour produire ainsi essentiellement de l'électricité.

Il est possible d'effectuer des soutirages de vapeur en cours de détente à différents niveaux de la turbine et donc à différents niveaux de température et de pression.

Cette technologie est certes éprouvée mais n'est pas très adaptée aux petites puissances. Elle est envisageable économiquement à partir d'une puissance électrique installée supérieure à 250 kWe. Le rendement électrique de telles installations reste faible dans les petites puissances.

Le moteur à vapeur

Le moteur à vapeur est une technologie déjà ancienne. Inventé au XIX^{ème} siècle, le moteur à vapeur avait petit à petit été abandonné au profit des turbines et des moteurs à combustion interne. Cependant quelques sociétés en ont re-découvert les intérêts et ont développé de nouveaux moteurs adaptés notamment à la cogénération bois.

Le cycle de la vapeur est pour ainsi dire le même que celui du procédé précédent si ce n'est que la détente a lieu dans un moteur et que la pression de la vapeur à l'entrée du moteur est moins élevée.

La vapeur produite en amont par la chaudière est introduite dans le moteur à l'intérieur duquel elle met en mouvement des pistons lors de sa détente. Le mouvement de translation ainsi obtenu est transformé en mouvement de rotation au moyen d'un système bielle – manivelle et entraîne l'arbre de l'alternateur produisant de l'électricité. La chaleur résiduelle de la vapeur est récupérée au niveau d'un condenseur en sortie du moteur pour les besoins thermiques d'un réseau de chaleur par exemple. L'eau est ensuite renvoyée à la chaudière.

Les moteurs à vapeur présentent l'avantage de fonctionner avec un rendement correct à charge partielle.

La filière organique de Rankine : une chaudière à huile et un fluide organique dans la turbine

Cette technique comprend deux cycles d'évolution thermodynamique : celui d'une huile thermique dans la chaudière et celui d'un fluide organique (en général du silicone) au niveau du module de production d'électricité.

Cycle chaudière : de l'huile thermique à forte inertie est utilisée comme fluide dans la chaudière, elle est chauffée de environ 200°C à 300°C et reste sous forme liquide. Elle transmet la chaleur dans un échangeur au fluide organique. Il est possible de récupérer une partie de la chaleur résiduelle de l'huile pour un réseau d'eau chaude avant que l'huile ne soit réintroduite dans la chaudière.

Cycle de production d'électricité : le fluide organique est évaporé par le transfert de la chaleur de l'huile thermique puis il est détendu dans la turbine qui entraîne l'alternateur. Le fluide organique reste sous forme gazeuse pendant la détente ce qui évite les problèmes de corrosion au niveau des pales de la turbine. La turbine, munie d'un grand rotor (près d'un mètre de diamètre) tourne à faible vitesse et de ce fait est directement couplée à l'alternateur sans aucun mécanisme de réduction. La faible vitesse périphérique de la turbine engendre des contraintes mécaniques faibles. A la sortie de la turbine, le fluide organique est condensé dans un échangeur en cédant sa chaleur latente à l'eau du réseau.

Quoique nécessitant un investissement plus élevé que pour un système vapeur, la technologie basée sur le cycle thermodynamique de Rankine présente un avantage de poids : le chauffage de l'huile à 300 °C ne requière pas les modes de fonctionnement réglementés des installations vapeur. La puissance électrique de ces installations varie entre 300 kWe et 1 MWe.

Le moteur à combustion externe – Stirling

Le moteur Stirling, technologie dont le principe a été inventé au XIXème siècle par deux frères écossais, les frères Stirling, est également connu sous l'appellation « moteur à air chaud ». Il s'agit d'un moteur alternatif à combustion externe dont le fonctionnement repose sur l'évolution d'un gaz pur (air, hélium, hydrogène ou azote) en circuit fermé soumis à une différence de température entre une source froide et une source chaude.

La chaleur issue du générateur (chaudière bois par exemple) est transmise au fluide, contenu dans une enceinte fermée, par l'intermédiaire d'un échangeur ou directement à travers la paroi de l'enceinte contenant le gaz pur.

Les deux pistons composant le moteur sont mis en mouvement par la dilatation et la compression du fluide successivement en contact avec la source froide et la source chaude. Le piston moteur entraîne l'alternateur.

Il existe plusieurs configurations du système.

Les pièces en mouvement à l'intérieur du moteur sont uniquement en contact avec le gaz de travail (propre), le risque d'encrassement est ainsi quasiment nul. De ce fait, la durée de vie du moteur est allongée et les temps de maintenance sont diminués.

Cette technique a été développée en aérospatiale et dans l'armement pour son silence de fonctionnement. Ces moteurs devraient offrir une gamme de puissance située entre 0 et 150 kW électriques.

Beaucoup de laboratoires universitaires et d'entreprises privées travaillent sur le développement de ce produit mais les références économiques et techniques couronnées de succès sont encore peu nombreuses. Aucune installation commerciale n'est actuellement en fonctionnement en Europe.

La filière gazéification

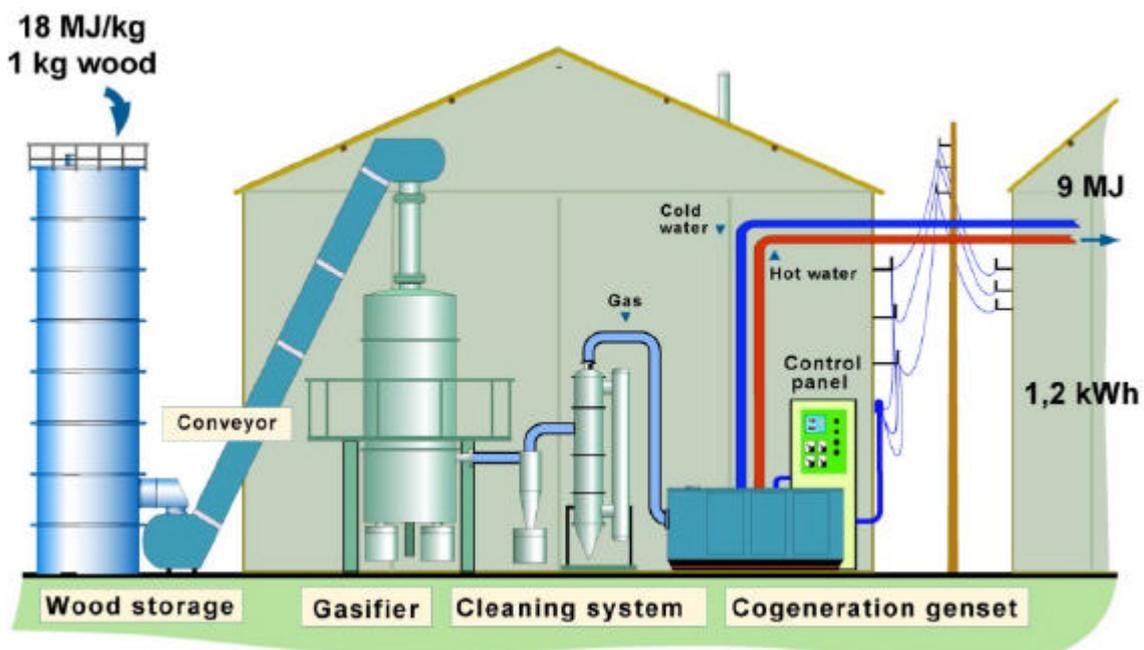


Schéma d'installation de XYLOWATT SA avec unité de gazéification et moteur à combustion interne.

Dans cette filière, le bois est gazéifié avant d'être envoyé dans le circuit de production d'électricité. Une unité de gazéification est donc nécessaire pour cette étape.

Le principe de la gazéification est un procédé thermo-chimique : le bois est décomposé en présence d'air, d'oxygène ou de vapeur d'eau en composés gazeux.

Le produit récupéré en sortie du gazogène est constitué par un mélange de gaz : de l'hydrogène H_2 , du monoxyde de carbone CO et du dioxyde de carbone CO_2 mais également du méthane CH_4 et de l'azote N_2 (si la gazéification est effectuée à partir d'air). La composition du gaz obtenu varie avec la nature du bois et peut contenir d'autres gaz notamment si le combustible est du bois de rebut (composés chloré ou soufrés).

Le mélange de gaz en sortie de gazogène contient également des cendres en suspension, des goudrons - composés hydrocarbonés - en plus ou moins grande quantité suivant la technologie, le type et l'humidité du bois utilisé.

Le gaz de synthèse a un pouvoir calorifique variant de 0,97 à 1,67 kWh/Nm³ selon les proportions entre les gaz combustibles et les gaz inertes dont les concentrations dépendent du type de procédé.

Il existe deux grands types de procédés de gazéification :

- ✓ **A lit fixe** : le combustible est introduit dans une enceinte et descend par gravité. Ces unités sont :
 - Soit à co-courant, le gaz de réaction circule dans le sens d'introduction du bois –généralement du haut vers le bas.
 - Soit à contre courant : le bois est introduit par le haut du réacteur et le gaz de réaction est introduit par le bas.
- ✓ **A lit fluidisé** : le combustible est mélangé à un lit de sable en mouvement.

Suite à l'unité de gazéification, un système de traitement du gaz élimine les cendres et les goudrons (cyclone, lavage humide pour les goudrons, filtre).

Cette étape de traitement est complexe et conditionne la bonne marche des appareils en aval (turbine ou moteur). En effet, si les gaz ne sont pas suffisamment nettoyés, il y a un risque d'encrassement en aval.

En général, au cours de ce traitement, les gaz sont refroidis avec la possibilité d'utiliser l'énergie thermique résiduelle pour le réseau de chaleur.

Le moteur à gaz

La production d'électricité est assurée par l'intermédiaire d'un moteur dual ou d'un moteur à gaz à combustion interne couplé, par l'intermédiaire d'un système bielle manivelle, à un alternateur qui produit l'électricité. En principe, les moteurs utilisés sont des moteurs standards qui sont légèrement modifiés afin de pouvoir fonctionner avec des gaz pauvres (gaz issus de la gazéification du bois). Suivant les accords avec les fabricants de moteurs, ces adaptations sont effectuées soit par les motoristes eux-mêmes soit par les fabricants d'unités de cogénération.



Deux types de moteurs sont disponibles :

- ✓ Le moteur dual est basé sur le principe d'un moteur diesel: l'inflammation du mélange gaz de bois et de l'air est provoquée par celle de diesel injecté en fin de compression dans le cylindre (environ 10% à 20 % en volume). Cette solution présente l'inconvénient de fonctionner en partie avec une source d'énergie fossile et peut éventuellement recevoir un soutien moins important vis à vis des politiques publiques en matière de réduction d'émission de CO_2 .
- ✓ Le moteur à gaz possède des bougies qui déclenchent l'inflammation du mélange gazeux (gaz issus du bois et air uniquement).

La détente du mélange gaz + air, lors de sa combustion dans le moteur, entraîne les pistons puis, par un système de transformation du mouvement alternatif en mouvement rotatif, l'alternateur.

Moteur d'une installation de XYLOWATT SA

La chaleur produite par la combustion au niveau des moteurs peut être récupérée grâce à un échangeur sur les gaz d'échappement, par refroidissement du moteur mais également au niveau du refroidissement des gaz en sortie de l'unité de gazéification.

La puissance électrique de ces systèmes varie actuellement de 15 à 1000 kWe par moteur.

La turbine à gaz (TAG)

Cette technologie est adaptée aux grosses puissances (supérieures à 1 MWe). Les installations sont semblables à celles fonctionnant au gaz naturel. Le gaz issu de la gazéification du bois est brûlé en mélange avec de l'air, au préalable comprimé dans un turbocompresseur, dans une chambre de combustion. Les gaz d'échappement sous pression issus de cette combustion subissent une détente dans une turbine à gaz couplée à un alternateur. Une partie de l'énergie mécanique produite peut être utilisée pour l'entraînement du turbocompresseur. Les gaz d'échappement détendus sont ensuite refroidis - la chaleur est récupérée et utilisée pour chauffer l'eau du réseau - puis évacués dans la cheminée.

Cycle combiné

Ce cycle combine deux techniques décrites précédemment : un cycle gaz et un cycle vapeur. Le combustible est utilisé sous forme de gaz, brûlé avec de l'air comprimé et détendu dans une turbine à gaz couplée à un alternateur. L'énergie résiduelle des gaz d'échappement détendus est utilisée pour chauffer et vaporiser de l'eau. La vapeur est ensuite détendue dans une turbine à vapeur, couplée à un second alternateur.

Cette technique n'est applicable que pour les grosses puissances et permet un rendement électrique important. La valorisation de la chaleur résiduelle se fait essentiellement au niveau du condenseur dans le cycle vapeur.

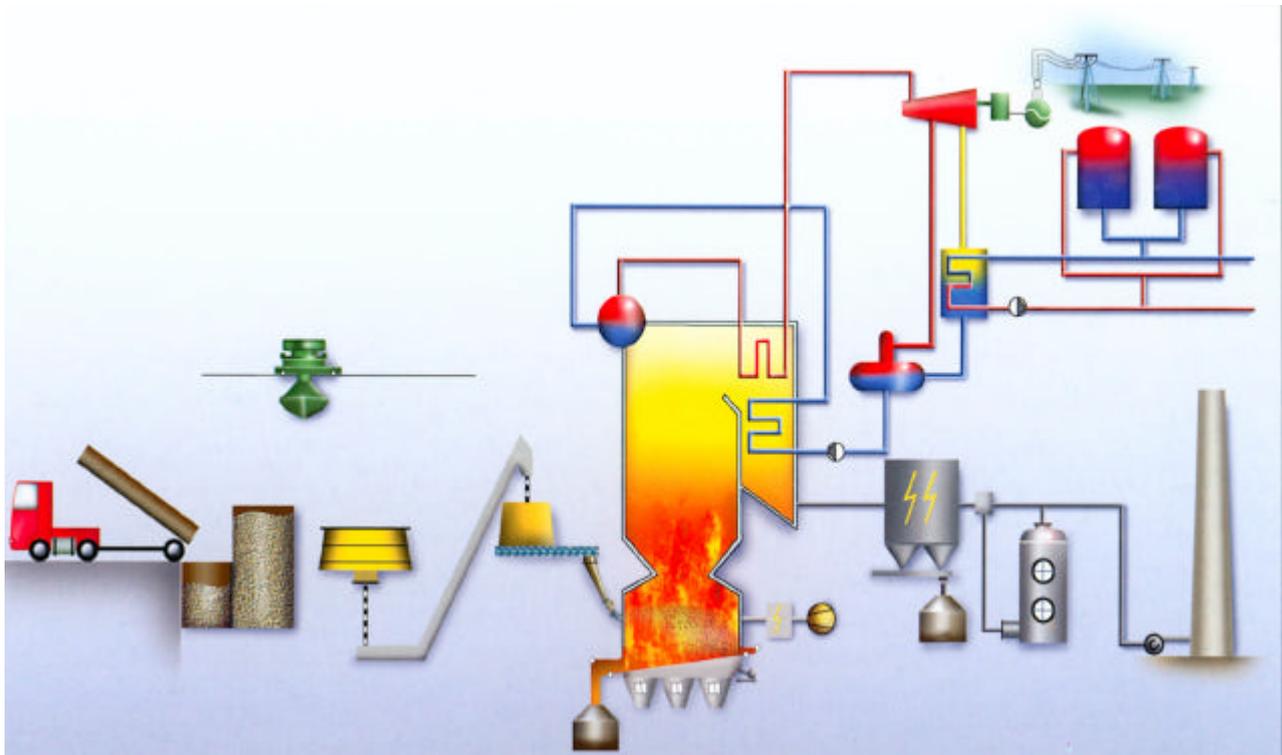


Schéma de l'unité de cogénération d'Assens (Dk) avec une turbine vapeur - VØLUND

Tableau récapitulatif des procédés de cogénération au bois/biomasse et critères de décision

Technologie	Gamme de puissances	Rendement électrique	Caractéristiques	Marchés
Turbine à vapeur	> 250 kWe	10 à 30 %	Technologie éprouvée – modules standardisés Faible rendement électrique Pression entrée turbine élevée donc contraintes de maintenance importantes	Industriel (pour les procédés utilisant de la vapeur) Collectif
Moteur à vapeur	60 à 1500 kWe	10 à 15 %	Technologie éprouvée Bonnes performances à charge partielle Maintenance	Industriel (avec procédés utilisant de la vapeur) Collectif
Cycle organique Rankine	300 à 1000 kWe	10 à 18 %	Pas de contraintes liées à la vapeur au niveau de la chaudière Faible rendement électrique	Industriel Collectif
Stirling	1 à 150 kWe	15 à 30 %	Pas de références en opération commerciale	Domestique Petit collectif
Moteur à gaz	15 à 1000 kWe	20 à 30 %	Maintenance élevée si le gaz issu de la gazéification du bois n'est que partiellement épuré	Industriel Collectif
Turbine à gaz	1 à 20 MWe	25 à 30 %	Applicable uniquement aux installations de grande puissance, utilisation de modules standardisés	Industriel Collectif

Il existe également d'autres technologies qui sont encore au stade de recherche et développement : ce sont notamment les micro-turbines (à gaz) et les piles à combustibles, deux technologies adaptées aux installations de petites puissances.

Informations à usage des utilisateurs de cet article

- **Reproduction autorisée avec mentions suivantes complètes :**

Article écrit par © ITEBE 2003, 28 boulevard Gambetta, F - 39004 Lons le Saunier Cedex

Tél. : +33 384 47 81 00, Email : info@itebe.org et Internet www.itebe.org)

La rédaction de cet article a bénéficié du concours financier de l'ADEME, agence française de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

- Publics cibles : techniciens, producteurs d'énergie, services techniques des villes, bureaux d'études, milieux politiques
- Cible géographique : International
- Nombre de caractères : 15 731 avec cet encart
- Auteur : Marie-Maud GERARD, ITEBE
- Crédits images : Xylowatt SA, Centrale d'Assens,
- Date d'écriture : 2003



- Date dernière mise à jour : 14 mai 2004