

La filière bois-énergie



Décembre 2004

La filière bois-énergie

Rédaction :

Romain Crehay & Didier Marchal

ValBiom - Valorisation de la biomasse asbl

c/o Centre wallon de Recherches agronomiques
Département Génie rural

Chaussée de Namur, 146
B-5030 Gembloux
Tel : 081 / 627 142
Fax : 081 / 615 847
info@valbiom.be
www.valbiom.be

Le symbole * se réfère à des mots, des unités ou des symboles dont la définition se trouve dans le glossaire en fin de document.

1	Pourquoi le bois-énergie ?	4
2	La filière bois et les possibilités de collecte	8
2.1	La filière bois et ses produits connexes	8
2.2	La collecte des produits connexes	9
3	Les combustibles - bois	11
3.1	Principaux paramètres caractérisant les combustibles	11
3.2	Les bûches	13
3.3	Les plaquettes (chips)	16
3.4	La sciure	19
3.5	Le bois densifié	19
3.6	Autres combustibles	22
4	Les technologies de conversion du bois en énergie	24
5	La pyrolyse flash	26
6	La carbonisation	27
7	La gazéification	29
7.1	L'oxy-gazéification	30
7.2	La gazéification à l'air	30
7.3	Application en Région wallonne : la cogénération par gazéification de bois	31
8	La combustion	34
8.1	Principes généraux de la combustion	34
8.2	Principaux paramètres influençant la combustion	34
8.3	La combustion du bois pour la production de chaleur	36
8.3.1	Petites puissances : chauffage domestique	37
8.3.2	Grandes puissances : applications dans les entreprises et le secteur tertiaire	40
8.3.3	Les chaufferies collectives et les réseaux de chaleur	45
8.4	La production d'électricité et la cogénération par combustion-vapeur	47
8.4.1	Les cycles turbine-vapeur	47
8.4.2	Moteurs à vapeur	49
8.5	La co-combustion	50
9	Le bois-énergie en Wallonie	51
9.1	Les industries de la transformation du bois	51
9.2	Le secteur public : le Plan Bois-Energie et Développement Rural	51
9.3	Les particuliers	52
10	Pour en savoir plus	53
11	Glossaire	55
12	Adresses utiles	57

1 Pourquoi le bois-énergie ?

Parce qu'il est respectueux de l'environnement

Réduction des gaz à effet de serre

Comme tous les combustibles dont les combustibles fossiles*, la production d'énergie à partir du bois libère du dioxyde de carbone¹ (CO_2) dans l'atmosphère. Celui-ci est un des principaux gaz à effet de serre (GES). S'il n'est pas le plus actif, il est le plus largement émis par l'activité humaine. La concentration anormale des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, engendrée par l'activité humaine, serait responsable d'un réchauffement de la planète dont les conséquences pourraient être désastreuses : changements climatiques, fontes des glaces, bouleversements des écosystèmes, etc.

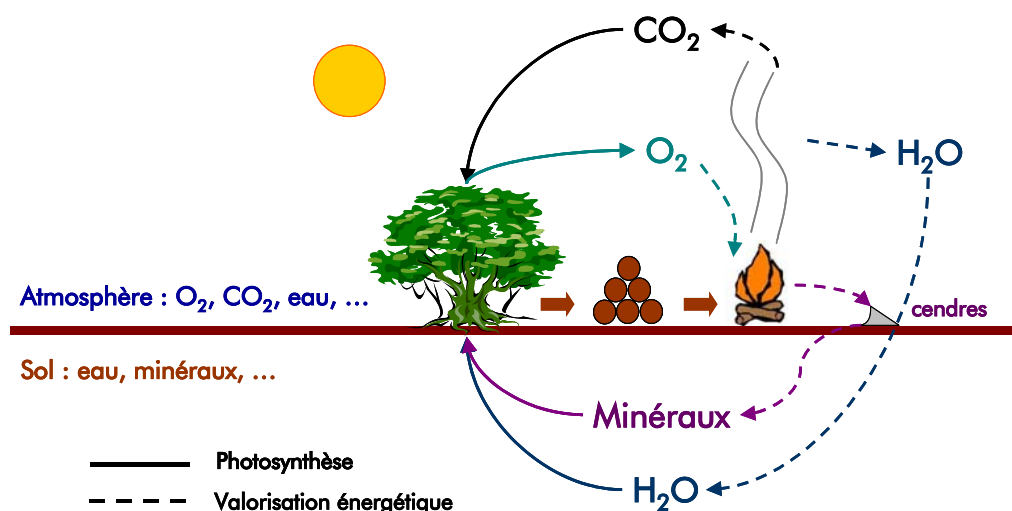


Figure 1 : Cycle du CO_2 engendré par le bois-énergie

Cependant, le gaz carbonique émis lorsque le bois brûle correspond à celui que l'arbre a prélevé dans l'atmosphère durant sa croissance². On dit que la balance en carbone engendrée par la filière bois-énergie est neutre car le cycle existant entre la photosynthèse de l'arbre et l'utilisation du bois comme combustible est parfaitement en équilibre et n'engendre pas l'émission de CO_2 additionnel (figure 1). Par contre, l'emploi de combustibles fossiles entraîne la libération de CO_2 qui a été prélevé il y a plusieurs millions d'années par la végétation préhistorique. A cette échelle de temps, nous pouvons dire que chaque utilisation de pétrole, de gaz ou de charbon génère du CO_2 nouveau, augmentant sa concentration dans l'atmosphère.

¹ Egalement appelé "gaz carbonique"

² Par la photosynthèse, les végétaux puisent le CO_2 présent dans l'atmosphère et l'utilisent pour fabriquer les éléments constitutifs du bois (cellulose, etc.).

Les combustibles fossiles sont principalement :

- **le pétrole**
- **le gaz naturel**
- **le charbon**

Ils portent ce nom car ils se sont formés pendant des millions d'années. Ils proviennent de la décomposition incomplète de la végétation qui couvrait alors la surface de la terre ou des organismes marins dans le fond des océans.

Tableau 1: émissions de gaz à effet de serre consécutives à l'utilisation de différentes technologies de production de chaleur (ces chiffres ne tiennent pas compte des émissions inhérentes à la production des combustibles-bois; Source : Van Themsche C. 2004)

	Equiv. CO ₂ en g/GJ* de combustible ³	
	min.	max.
Chauffage domestique		
Poêle à bois	391	7.130
Chaudière à bois (combustion inversée)	46	207
Chaudière au gaz naturel	63.223	63.223
Chaudière au mazout	73.138	73.138
Chauffage collectif ou industriel		
Bois :		
Combustion en lit fixe	355	928
Combustion en lit fluidisé	0	580
Gazéification en lit fixe	0	230
Energies fossiles :		
Chaudière au gaz naturel	55.237	61.489
Chaudière au mazout	73.534	74.673

Même en tenant compte de l'énergie nécessaire pour produire les combustibles-bois (sylviculture, abattage, broyage, transport, etc.), le développement du bois-énergie, en substitution aux combustibles fossiles, permettra de réduire drastiquement les émissions des gaz à effet de serre.

Le protocole de Kyoto concerne six gaz à effet de serre:

- **le dioxyde de carbone (CO₂),**
 - **le méthane (CH₄),**
 - **le dioxyde d'azote (NO₂),**
 - **les hydrocarbures fluorés (HFC),**
 - **les hydrocarbures fluorés entièrement halogénés (PFC),**
 - **l'hexafluorure de soufre (SF₆)**
-

³ L'utilisation de ces équipements de production d'énergie engendre l'émission de CO₂ ainsi que d'autres gaz à effets de serre en teneurs plus faibles comme le CO, le méthane, etc. Pour pouvoir additionner ces différentes émissions gazeuses dans une même unité, on traduit les effets de ces gaz sur l'atmosphère en équivalent CO₂.

Le bois est un combustible durable

Le bois est considéré comme un combustible *durable*⁴. Du moins il l'est si la forêt est également gérée de façon durable et responsable. Il ne faut pas prélever plus de bois qu'elle ne pourrait produire. A l'heure actuelle, les prélèvements en forêt wallonne sont de loin inférieurs aux accroissements, respectivement de 3,2 millions de m³ de bois contre 4,1⁵.

Parce qu'il maintient une activité rurale

Que ce soit pour la production, le stockage, le transport, la vente des combustibles-bois ou pour l'installation et le suivi de chaufferies, le bois-énergie assure un développement de nouveaux types d'activités. Il a été estimé que l'évolution de la filière bois-énergie en Belgique pourrait créer ou maintenir à l'horizon 2015 jusqu'à 15.195 emplois directs et indirects⁶. De plus, ces nouvelles activités seraient principalement localisées dans les zones rurales : agriculteurs, etc.

Parce qu'il permet de réduire la facture énergétique

L'utilisation du bois pour le chauffage domestique est souvent financièrement plus avantageuse que le recours à des combustibles fossiles dont le prix a connu une nette augmentation ces dernières années.

Pour les chaufferies de puissance plus importante, les industries de transformation du bois tirent un double avantage en utilisant leur produits connexes en tant que combustible. Ces bois sont non seulement gratuits mais leur valorisation énergétique permet en plus d'économiser le coût de leur mise en décharge.

Mis en place par la Région wallonne depuis juin 2003, le système des certificats verts⁷ offre une aide à la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables. S'ajoutant aux bénéfices engendrés par la vente de l'électricité sur le réseau, ce mécanisme améliore nettement la rentabilité des centrales de cogénération* à partir de bois.

⁴ Le concept de développement durable est apparu à Rio lors du Sommet de la Terre en 1992. Il signifie "qui répond au besoin des générations présentes sans compromettre ceux des générations futures".

⁵ Source : Lecomte H. 2002.

⁶ Source : Van Themsche C. 2004.

⁷ Pour plus d'informations sur le système des Certificats verts, visitez le site de la Commission wallonne pour l'Energie (CWAPE) : <http://www.cwape.be>

Parce qu'il permet de limiter les importations de combustibles et la dépendance énergétique de la Région wallonne

L'uranium, le gaz naturel, le mazout et le charbon actuellement utilisés en Wallonie pour produire de l'énergie sont largement importés de pays dont la stabilité politique est parfois précaire. Produit local, le bois contribue dans ce contexte à une sécurité d'approvisionnement ainsi qu'à une réduction de la dépendance énergétique de la Wallonie (actuellement de 98%⁸).

⁸ Cela signifie que 98% de l'énergie consommée en Région wallonne est importée. Elle provient principalement du Moyen-Orient, d'Afrique du Nord et de Russie.

2 La filière bois et les possibilités de collecte

2.1 La filière bois et ses produits connexes

La filière bois, dans son ensemble, est relativement complexe. Elle peut se schématiser de la manière suivante :

- production biologique (bois sur pied, y compris « bois agricole ») ;
- exploitation forestière conduisant à la production de deux types de matières : d'une part le bois d'œuvre et le bois d'industrie, d'autre part le bois de chauffage. A ce stade, il faut également tenir compte d'une certaine forme d'auto-consommation (difficilement chiffrable) du bois de chauffage. Par ailleurs, une part – parfois non négligeable – de bois reste encore en forêt ;
- les industries de la première transformation du bois (scieries, entreprises de déroulage, ...) ;
- les industries de la seconde transformation (menuiseries, fabriques de panneaux, ...) ;
- le bois de rebut ou bois en fin de vie.

A chacune de ces étapes, outre la production de matériaux en bois, d'autres produits apparaissent. Parfois appelés « déchets », on leur préfère généralement le vocable « produits connexes » ou « co-produits ». Le tableau suivant reprend, de manière simplifiée, les principales étapes de la filière bois et les sous-produits qui en découlent.

Tableau 2 : Principaux produits connexes de la filière bois

Etape	Produits connexes
Exploitation forestière	Sciures, copeaux, écorces, plaquettes, chutes diverses
Industries de la première transformation	Écorces, sciures, plaquettes, chutes diverses
Industries de la seconde transformation	Copeaux, sciures, chutes diverses
Bois de rebut	Plaquettes

A ces étapes « classiques » de la filière bois, il convient d'ajouter d'autres sources potentielles de combustibles ligneux. L'entretien des bords de route ou des bordures de voies de chemin de fer nécessite l'abattage de tiges de dimensions parfois importantes, les haies ou les arbres isolés peuvent produire des quantités non négligeables de bois. Pour ces opérations, les tiges sont généralement broyées et laissées sur place. Les grumes, de dimensions plus importantes, sont parfois vendues pour être valorisées sous une forme ou sous une autre (en scierie par exemple).

Les produits connexes présentent des caractéristiques bien distinctes en fonction de leur origine. Elles se traduisent en termes de granulométrie, de pureté ou encore de taux d'humidité.



Figure 2 : : Les dosses, produits connexes des scieries

2.2 La collecte des produits connexes

Parmi les produits connexes actuellement issus de la filière bois, une certaine quantité est déjà **valorisée sous forme de matière**. Il s'agit essentiellement de sciures propres (issues de la première ou de la seconde transformation). Les grosses entreprises ont généralement des contrats d'enlèvement de ces produits avec des sociétés de transport spécialisées. La destination est l'approvisionnement d'usines de fabrication de panneaux. Il faut toutefois constater que de nombreuses petites entreprises (scieries, menuiseries, ...) ne disposent pas de quantités suffisantes de produits connexes que pour pouvoir négocier des contrats d'enlèvement avec les sociétés spécialisées. Ces entreprises doivent alors trouver un moyen de se débarrasser de ces « déchets », si possible aux moindres frais... la dernière extrémité étant la mise en décharge.

Divers types de produits connexes peuvent également avoir une vocation particulière. C'est le cas, par exemple, des écorces qui peuvent être utilisées en horticulture.

Certaines entreprises de la filière bois valorisent déjà les produits connexes sous forme d'**énergie**. A titre d'exemple, on citera l'utilisation du bois pour le chauffage des locaux (ateliers et bureaux), l'alimentation de séchoirs à bois ou encore la production d'électricité.

En ce qui concerne les autres sources potentielles de bois-énergie, il s'agit le plus souvent de faibles gisements très éparpillés sur le territoire. Des opérations de collecte sont alors nécessaires pour pouvoir les valoriser au mieux et, si possible, aux moindres coûts. Ainsi, les plaquettes issues du déchiquetage des arbres et arbustes de bord de route sont le plus souvent laissées sur place. Il y a certes un rôle de paillage indéniable, mais les quantités laissées sur place (souvent en tas) sont excédentaires par rapport à la quantité nécessaire au paillage. La mise en place d'un système de collecte nécessiterait l'utilisation de véhicules supplémentaires et la possibilité de disposer de zones de stockage adéquates. Des **plate-formes bois-énergie** auraient donc un rôle à jouer dans ce cadre. Idéalement réparties sur le territoire wallon, elles auraient une triple fonction :

- d'une part, servir de lieu de collecte de différentes catégories de bois ;
- ensuite, assurer un tri et un conditionnement de ces matériaux ;
- enfin, assurer l'approvisionnement de sites utilisateurs de combustibles ligneux (réseaux de chaleur, sites industriels, ...).

De telles structures existent déjà : elles ne se limitent pas à la seule production du bois-énergie, mais à la gestion de sous-produits ou de déchets de toutes origines.

3 Les combustibles - bois

3.1 Principaux paramètres caractérisant les combustibles

Contenu énergétique

Le contenu énergétique du bois est exprimé par son pouvoir calorifique. Il représente la chaleur dégagée par sa combustion complète.

Lorsque le bois brûle, l'eau qu'il contient se dégage sous forme de vapeur avec les fumées. Une partie de l'énergie produite au sein du foyer va être utilisée pour transformer cette eau en vapeur. Pour ne pas biaiser l'évaluation du contenu énergétique d'un combustible en tenant compte de cette perte énergétique difficilement exploitable (sauf dans le cas des dispositifs spéciaux des chaudières à condensation), on parle alors de pouvoir calorifique inférieur (PCI)*.

$$PCI = \left[\begin{array}{l} \text{contenu énergétique total} \\ \text{du combustible (PCSupérieur)} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{contenu énergétique de la vapeur d'eau} \\ \text{émise lors de sa combustion complète} \end{array} \right]$$

Le pouvoir calorifique est exprimé en MégaJoules par kilogramme (MJ/kg), la kilocalorie par kilogramme (kcal/kg) étant une ancienne unité usuelle⁹. Le PCI du bois anhydre (c'est-à-dire contenant 0% d'eau), et dépourvu de matière minérale¹⁰, est relativement constant, de l'ordre de 18,4 MJ/kg et ce, quelle que soit l'essence (résineux ou feuillu).

Tableau 3 : PCI indicatif de divers combustibles
(Sources : Institut wallon 2002, Carré et al. 1991, norme EN 13240)

PCI indicatif de divers combustibles	
1 m ³ de gaz naturel	36,1 MJ
1 l de mazout	36 MJ
1 kg de charbon	de 25 à 33 MJ
1 kWh d'électricité	3,6 MJ
1 kg de bois anhydre	18,4 MJ

Quelle que soit l'essence (résineux ou feuillu), le contenu énergétique du bois anhydre est le même (18,4 MJ/kg ou 5,1 kWh/kg)

⁹ Le Joule est l'unité internationale pour exprimer l'énergie. Le kiloWatt heure (kWh) représente également une énergie, il est fréquemment utilisé lors d'activités commerciales. 1 kWh représente 3,6 millions de Joules (ou 3,6 MJ).

¹⁰ La matière minérale, par opposition à la matière organique, ne produit pas de chaleur. Mais, alors que le contenu en énergie reste inchangé, la présence de matière minérale (surtout présente dans les feuilles, aiguilles et l'écorce) augmente la masse du bois. La quantité d'énergie par unité de masse (PCI) d'un bois contenant beaucoup de matière minérale sera donc plus faible.

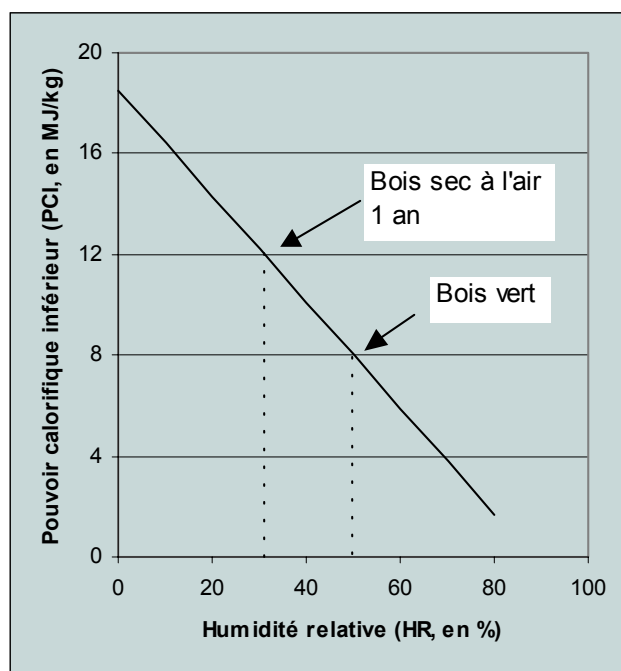
Humidité

L'humidité relative (HR), exprimée en %, représente la quantité d'eau contenue dans le bois par rapport à sa masse humide ou sèche. En pratique, on exprime l'HR sur base humide ; c'est celle que nous utiliserons dans ce document.

$$HR_{\text{Base Humide}} (\%) = \frac{\text{contenu en eau du bois (en kg)}}{\text{masse totale du bois (bois + eau, en kg)}} \times 100$$

Le bois vert contient environ 50 % d'eau. Après séchage, la teneur en eau du bois se stabilise : elle est en équilibre avec celle de l'air et atteint environ 20 % pour un séchage à l'air libre. Sous abri, le bois sèche plus vite et atteint une humidité d'équilibre plus faible, jusque 15 %.

L'évaporation de l'eau demande de l'énergie ; la valeur énergétique du bois sera donc d'autant plus faible que celui-ci contient de l'eau. Le PCI du bois diminue lorsque son humidité augmente.



(Sources : Marchal 2001 ; Carré et al. 1991)

Tableau 4: relation entre humidité et PCI du bois
(Source : Carré et al. 1991)

	Humidité relative (ordre de grandeur en %)	PCI (ordre de grandeur en MJ/kg)	Equivalence en litre de mazout
<i>Bois frais</i>	50 %	7,7	0,2
<i>Bois sec 1 an</i>	30 %	11,8	0,3
<i>Bois sec 2 ans</i>	20 %	13,9	0,4
<i>Bois anhydre</i>	0 %	18,4	0,5

Masse volumique

La masse volumique du bois, exprimée en kg/m³ représente la masse du bois par unité de volume :

$$\text{Masse volumique (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{masse du bois (en kg)}}{\text{volume du bois (en m}^3\text{)}}$$

Tableau 5 : masse volumique moyenne de quelques essences, en kg/m³

	Bois vert (frais, HR : 40-60%)	Bois sec à l'air (18 mois, HR : 25-30 %)	Bois anhydre (0% d'eau)
<i>Chêne</i>	1000	750	625
<i>Hêtre</i>	980	750	625
<i>Epicéa</i>	760	450	400
<i>Douglas</i>	-	550	460
<i>Sapin pectiné</i>	970	550	460

Ainsi, 1 m³ de chêne pèse une tonne tandis qu'1 m³ d'épicéa ne pèse que 760 kg (bois frais).

Selon que l'on considère le volume réel d'un morceau de bois ou le volume d'encombrement d'un empilement de combustible-bois, on parlera respectivement de la masse volumique réelle ou de la masse volumique apparente.

La connaissance de la masse volumique du bois est importante car celui-ci est parfois vendu par unité de volume apparent (map*, stère*) alors que son contenu énergétique dépend de sa masse.

3.2 Les bûches

Les bûches proviennent de l'exploitation de taillis ou de récupération de houppiers lors de coupes commerciales de bois. Il s'agit de bois dont la qualité et les dimensions ne sont pas suffisantes pour des usages dits nobles : sciage (fabrication de meubles, etc.), tranchage ou déroulage (utilisation en menuiserie, etc.). Les bûches sont vendues sur pied ou "bord de route", débitées, conditionnées en stères et parfois même séchées.

Les bûches constituent la forme de combustible bois la plus connue et la plus répandue pour le chauffage domestique. Elles sont plus rarement utilisées pour le chauffage collectif ou industriel car la manutention que demandent les fréquents rechargements de l'installation représente un coût de fonctionnement important.



Figure 3 : Empilement de bûches

Les bûches sont des combustibles extrêmement hétérogènes. Elles peuvent être d'essences variées, de bois vert ou de bois sec, de gabarits différents, aussi bien rectilignes que noueuses et irrégulières. Les bûches demandent un espace de stockage important, de préférence à l'abri des précipitations.

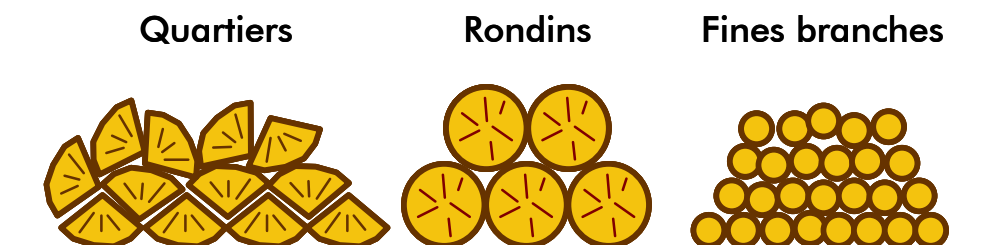


Figure 4 : Diverses formes de bûches

Contrairement au bois d'œuvre (acheté au m³) et au bois de trituration (généralement acheté à la tonne ou au map¹¹), un volume de bûches pour le chauffage est exprimé en stères. Un stère est un empilement de 1 m x 1 m x 1 m de bûches¹².

¹¹ mètre cube apparent de plaquette voir chapitre 3.3

¹² Le volume d'un empilement de bûches est encore parfois exprimé en corde. Cette unité est à éviter parce que, en fonction des régions, elle ne signifie pas la même chose (une corde = 1,2 ou 3 stères).

Prix

Le prix des bûches est lié à plusieurs facteurs :

- si le bois est vendu sur pied, l'acheteur devra le couper lui-même ou faire effectuer la coupe par un professionnel ; ceci peut engendrer une grande différence de prix ;
- selon les essences, le bois brûle plus ou moins rapidement. Les bois de moins bonne qualité pour le chauffage seront beaucoup moins chers ;
- le transport des bûches peut entraîner un surcoût important ;
- si le bois est humide, il sera de moins bonne qualité pour le chauffage ; il sera donc moins cher mais nécessitera un lieu de séchage. Le bois déjà sec sera plus cher ;
- par l'équilibre entre l'offre et la demande, le bois de chauffe sera vendu moins cher dans les régions les plus boisées (Sud Namurois, Province de Luxembourg,...) que là où les forêts sont plus rares (Hesbaye, Région flamande,...);
- le prix des bûches peut chuter de façon spectaculaire après des invasions de ravageurs (le scolyte du hêtre, par exemple) dégradant le bois, ou après de grandes tempêtes, livrant sur le marché une quantité anormalement élevée de bois.

Les bûches	
Avantages :	facilement disponibles prix attractif
Inconvénients :	très hétérogènes demandent une manutention importante demandent une place suffisante de séchage et de stockage
Humidité :	variable en fonction du temps de séchage ; de 50 % pour le bois vert à 20 % pour le bois séché 2 ans sous abri
PCI	d'environ 7 à 14 MJ/kg en fonction de l'humidité
Prix :	2,50 à 7,50 € le stère sur pied 20 à 25 € le stère coupé frais 30 à 42 € le stère coupé sec 2 ans Pour des conditions d'exploitation aisées, transport non compris

3.3 Les plaquettes (chips)

Les plaquettes (ou chips) sont des morceaux de bois déchiquetés. Leurs caractéristiques varient largement selon le bois dont elles proviennent. Les plaquettes sont produites à partir :

- de sous-produits d'exploitation forestière (éclaircies, houppiers*, tête de résineux, etc.) ou de coupes d'entretien de bord de route, de haies. Produites à partir de bois verts, ce sont des plaquettes dont l'humidité avoisine 50 % sur masse brute.
- des produits connexes des entreprises de première et seconde transformation du bois. Ce sont des plaquettes respectivement assez humides (dosses*, délignures*, etc.) ou sèches (chutes de découpe de planches par exemple).
- de bois de rebut (parc à conteneurs, palettes, etc.). Egalement très sèches, ces plaquettes demandent une attention particulière quant à la présence de revêtements et imprégnations divers (peinture, etc.) ou d'objets métalliques comme des clous.

Notons que les plaquettes peuvent également provenir de cultures énergétiques comme le taillis à très courte rotation (TtCR) où des arbres à croissance rapide, généralement du saule ou du peuplier, sont cultivés à la seule fin énergétique et récoltés environ tous les trois ans. Les taillis à très courte rotation sont particulièrement bien développés dans les pays scandinaves.

Il est important de rappeler que la majorité des produits connexes des industries de transformation du bois est réutilisée par les entreprises de trituration (fabrication de papier et de panneaux). Seuls les bois ne convenant pas à cet usage seront déchiquetés et utilisés pour la production d'énergie. Le plus souvent, ce sont les entreprises de transformation du bois qui utilisent elles même le combustible pour la production de chaleur voire d'électricité. La valorisation énergétique de ces produits connexes permet d'épargner le coût de leur mise en décharge.

Les plaquettes forment un combustible beaucoup plus homogène que les produits de départ. La mise en plaquettes de produits connexes aux dimensions variées permet de faciliter le stockage, le séchage et le transport du combustible. Cette homogénéité et leur taille réduite rend également possible l'automatisation complète de la chaudière qui ne demande aucun chargement manuel.

Pour déchiqueter le bois, il existe plusieurs types de déchiqueteuses (à disques, à tambour, etc.), autonomes ou non. En fonction de leurs caractéristiques, elles peuvent accepter différents types de bois et produire des plaquettes de dimensions déterminées (moyennant, notamment, l'usage d'un crible). Les plaquettes ont approximativement la forme d'un parallélépipède dont la longueur est la seule dimension réglable. La largeur et l'épaisseur sont, elles, soumises aux aléas de la fragmentation. La longueur des plaquettes varie de 10 à 80 mm.



Figure 5 : Plaquettes forestières

Le contenu énergétique des plaquettes sera évidemment le même que celui du bois dont elles proviennent. Il faut prendre en considération les mêmes critères que pour le bois non broyé (importance de l'essence et de l'humidité). Le PCI des plaquettes est équivalent à celui du bois d'origine.

La teneur en eau varie en fonction du prétraitement (séchage) et du temps de stockage. Le bois est préférentiellement broyé frais afin de réduire l'usure des pièces coupantes du broyeur. L'humidité des plaquettes passe de 50 à 25% pour des conditions normales de séchage (sous abri et bien aéré). Il est préférable de stocker les plaquettes à l'abri des précipitations.

Les transactions de plaquettes se font généralement en *mètre cube apparent de plaquettes* (map). Il s'agit d'un volume apparent de 1 m³ de plaquettes, contenant du bois et des interstices remplis d'air. 1 m³ de bois plein donnera après broyage un tas d'environ 2,5 map¹³, c'est-à-dire un tas de 2,5 m³ contenant du bois décheté et de l'air. L'important volume d'encombrement de ce combustible est un paramètre dont il faut tenir compte. Il est nécessaire de disposer d'un volume suffisant de stockage (hangar, remise, etc.).

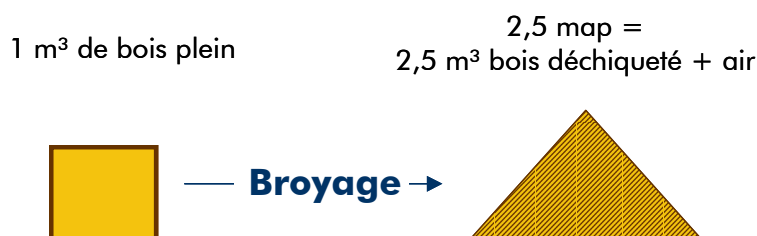


Figure 6 : Le map, volume apparent de plaquettes

¹³ Il s'agit bien évidemment d'un chiffre moyen. Selon le type de broyeur et la matière première utilisés, les variations peuvent être importantes

1 m³ de bois plein donnera, après broyage, un tas d'environ 2,5 map, c'est-à-dire un tas de 2,5 m³ contenant du bois déchiqueté et de l'air

Prix

Le prix des plaquettes provenant des industries de transformation du bois avoisine 16-20 €/map. Celles provenant de l'exploitation forestière seront plus chères. Il faut toutefois apporter quelques nuances en considérant les points suivants :

- au niveau des résidus d'exploitation forestière, le rendement du broyeur utilisé aura un impact considérable sur le prix de revient des plaquettes ;
- en ce qui concerne les résidus d'industries de transformation du bois, certaines entreprises sont prêtes à mettre gratuitement à disposition des produits dont elles n'ont pas la possibilité de se débarrasser. Dans ce cas, seul le transport est à prendre en considération ;
- tant pour les plaquettes forestières que pour celles issues de l'industrie du bois, le transport peut intervenir sur le prix final de la plaquette. Dans ce cas, il faut prendre en considération la distance qui sépare le site de production et celui où seront utilisées les plaquettes ;
- enfin, les ordres de grandeurs donnés ci-dessus vont vraisemblablement évoluer lorsque le marché de la plaquette sera un peu plus structuré en Région wallonne.

Les plaquettes de bois (chips)

Avantages :	manutention aisée automatisation des installations de chauffage
Inconvénients :	demandent un volume de stockage important plus facilement utilisable en milieu rural
Humidité :	50 % frais, 25-30 % après une saison de stockage en tas sous abri ventilé
PCI :	comme pour les bûches, il varie en fonction de l'humidité
Prix :	Prix indicatifs : 16-20 €/map (résidus d'industries de transformation du bois)

3.4 La sciure

La sciure est constituée de fines particules de bois. Elle est produite lors du sciage des grumes (il s'agit alors de sciure assez humide) ou lors du travail de planches dans les industries de seconde transformation du bois (fabriques de meubles, etc.), dans ce second cas, la sciure sera plus sèche et sera couramment produite en mélange avec d'autres formes de résidus de bois sec.

Au sein de ces entreprises, la sciure est collectée au niveau des outils, par un système mécanique ou d'aspiration, ou alors ramassée, à même le sol, au pied des machines (sciure dite "sale"). Elle est ainsi véhiculée jusqu'à une zone de stockage : conteneur ou silo tour. La sciure se conserve très mal.

En Région wallonne, la sciure ne fait pas à proprement parler l'objet d'un marché pour une utilisation énergétique. Elle est généralement récupérée pour la fabrication de panneaux de particules. La sciure est parfois utilisée en chaudière sur le site même de la production pour le séchage de bois ou le chauffage de locaux.

La sciure sert de base à la fabrication des combustibles densifiés, mais elle n'est pas encore utilisée à cette fin en Wallonie.

La sciure	
Avantages :	gratuite pour l'entreprise qui la produit
Inconvénients :	se conserve très mal demande des installations adaptées à la fine granulométrie
Humidité :	40 à 60 % pour les sciures de première transformation du bois 10 à 15 % pour les sciures de seconde transformation du bois
PCI :	varie dans une large mesure en fonction du bois dont elle provient : de 6 à 15,5 MJ/kg
Prix :	ne fait pas l'objet d'un marché pour une utilisation énergétique en Région wallonne utilisée sur site ou vendue aux industries de panneaux

3.5 Le bois densifié

Le bois densifié est produit à partir de déchets de bois de petites dimensions, principalement de la sciure. Celle-ci est séchée et compressée en un matériau dense et cohérent. Aucune colle n'est nécessaire pour assurer la cohérence du combustible. En fonction du gabarit de l'orifice de sortie de la presse, le bois densifié aura la forme de granulés (pellets), de bûchettes (cylindre) ou de briquettes (forme de brique).

Il est possible d'utiliser des déchets de bois autres que de la sciure comme des copeaux. Un broyage préalable sera peut-être nécessaire, augmentant le coût de production.

Le bois densifié a un contenu énergétique par unité de volume tout à fait exceptionnel. Il a deux origines. D'une part, la sciure est fortement compressée, il y a donc beaucoup plus de matière par unité de volume – encore plus que dans une bûche par exemple. D'autre part, pour permettre une bonne cohésion, la sciure est préalablement séchée en entrant dans la presse. Elle doit descendre au minimum à 12% d'humidité. Ce très faible contenu en eau confère au bois densifié un PCI plus important.

Le bois peut être densifié avec plus ou moins de soin (choix de la matière première, humidité, etc.). Il en résulte que les bois densifiés peuvent être de qualité variable. Les principales qualités recherchées sont la résistance à l'abrasion lors du transport et de la manutention ainsi que la conservation au stockage. En comparant les prix d'achat de ces combustibles entre les différents fournisseurs, il est donc important de considérer également la qualité du produit.

Différentes normes sur la qualité du bois densifié existent dans les pays les plus utilisateurs (une norme européenne est en préparation). Celles-ci imposent des règles strictes de fabrication. Par le respect de ces normes, les fabricants assurent aux consommateurs l'achat d'un produit fiable. De plus, les granulés normalisés sont de qualité stable et homogène (humidité, taux de cendres, résistance à l'abrasion et aux chocs, etc.) ; il est ainsi possible de régler les chaudières de façon optimale.

Très dense, ce sont les combustibles-bois qui prennent le moins de place, un volume de stockage moins important sera donc nécessaire.

Les granulés de bois ou pellets

Les pellets sont des particules cylindriques de bois densifié. Leur diamètre varie entre 6 et 12 mm pour une longueur allant jusque 20 mm. Leur petite dimension et leur surface lisse leur procure une grande fluidité permettant l'entière automatisation des installations de production d'énergie.

Les granulés peuvent être achetés selon des conditionnements aussi divers que le sac de 15 kg ou le bateau cargo. Le prix du granulé est tributaire de la quantité achetée et des frais de transport. L'existence d'une unité de production à proximité du lieu d'utilisation fait généralement baisser les prix.

**2 kg de granulés équivalent à 1 l de mazout.
Une palette de 1.000 kg de granulés équivaut à 4,5 stères de bois**



Figure 7 : Granulés de bois ou pellets

Grâce à un contenu maximum garanti en écorce dans les granulés, leur combustion donne également très peu de cendres (moins de 1% si absence d'écorce).

Les granulés de bois (pellets)

Avantages :	permet l'automatisation des installations : grand confort d'utilisation pour le chauffage domestique en petite puissance combustion très performante
Inconvénients :	pour les poêles à pellets : perte de l'aspect "feu de bûches"
Prix :	160 à 260 €/tonne en fonction de la quantité achetée et du transport.

Les bûchettes et les briquettes

Le bois densifié peut également prendre la forme de bûchettes ou de briquettes. De plus grandes dimensions (5-10 cm de diamètre ou de largeur pour 20-30 cm de longueur), elles ne peuvent être utilisées dans des installations automatiques mais gardent les avantages des combustibles à haute densité énergétique. Elles s'utilisent comme produit de substitution des bûches dans les appareils de chauffage domestique.

Les bûchettes et briquettes

Avantages :	d'usage pratique pour les particuliers en dehors des zones rurales maintien de l'aspect "feu de bûches"
Inconvénients :	pour les applications domestiques (feux ouverts, poêles, etc.) : installations non automatisées
Prix :	de 170 à 250 €/tonne, dépend de la quantité achetée et du transport

3.6 Autres combustibles

Les industries de transformation du bois sont également susceptibles de générer d'autres formes de produits connexes tels les copeaux, les poussières de ponçage, les écorces, les noyaux de déroulage, etc.

Les copeaux sont des éclats de bois résultant d'activités comme le rabotage. Il s'agit d'un combustible généralement très sec et aux dimensions hétérogènes. Les copeaux sont couramment produits en mélange avec de la sciure sèche et des poussières de ponçage. Leur valorisation énergétique se fait dans des installations adaptées à ce mélange.

Certaines scieries écorcent* les grumes* avant leur sciage. Les écorces sont plus difficilement valorisables pour la production d'énergie car, d'une part, elles sont généralement fort humides et, d'autre part, elles ont un taux de cendres fort élevé. Les chaudières utilisant des écorces sont spécialement conçues pour faire face à ces deux propriétés. Plus coûteuses, ces installations ne seront rentables que pour des chaufferies de très grande puissance.

La valorisation énergétique des écorces reste le plus souvent limitée à la scierie où elles ont été produites. Les écorces trop longues peuvent poser problème au niveau du système de convoyage qui devra être adapté. Sinon, ces écorces seront broyées avant usage.

Tableau 6 : Comparaison indicative des combustibles-bois
(ordre de grandeur, entrée chaudière hors transport ; source : ADEME 1999, Carré et al. 1991 ; * : ne fait pas encore l'objet d'un marché énergétique en Wallonie)

	Origine	Prix d'achat moyen		PCI ¹⁴ (moyenne)	Humidité sur masse brute	Masse volumique	Energie volumique
		Façonné sec 2 ans (humidité 20%) ¹⁵					
Bûches	<ul style="list-style-type: none"> ▪ rémanents forestiers (feuillus) ▪ taillis 	Façonné sec 2 ans (humidité 20%) ¹⁵	35 €/stère	2.100 à 3.900 kWh/t	20 à 50 %	250 à 760 kg/stère	1.500 à 2.000 kWh/stère
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ entretien de haies ou de bords de route 		*				
Plaquettes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ broyage de rémanents lors d'exploitation forestière 		*	2.200 à 3.900 kWh/t	20 à 50 %	180 à 400 kg/m ³	600 à 1.000 kWh/map
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ broyage lors d'entretien de haies ou de bords de route 		*				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ broyage de sous-produit de l'industrie de transformation du bois 		16-20 €/map				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ bois de rebut 		¹⁶	3.300 à 3.900 kWh/t	20 à 30 %	170 à 270 kg/m ³	600 à 950 kWh/map
Sciure humide	<ul style="list-style-type: none"> ▪ scierie 		¹⁶	1.600 à 2.800 kWh/t	40 à 60 %	230 à 520 kg/m ³	600 à 1.000 kWh/map
Sciure sèche en mélange avec des copeaux, ...	<ul style="list-style-type: none"> ▪ seconde transformation du bois 		*	4.400 kWh/t	10 à 15 %	80 à 110 kg/m ³	350 à 500 kWh/map
Pellets	<ul style="list-style-type: none"> ▪ densifié à partir de sciure séchée 	Sac	190 à 260 €/t	4.600 kWh/t	8 à 12 %	700 à 750 kg/m ³	3.200 à 3.500 kWh/map
		Palette	160 à 210 €/t				
		Vrac camion	160 à 180 €/t				
Ecorces	<ul style="list-style-type: none"> ▪ scierie 		*	1.800 à 2.300 kWh/t	40 à 60 %	330 à 390 kg/map	600 à 950 kWh/map

¹⁴ Varie en fonction de l'humidité

¹⁵ L'utilisateur peut également acheter des bûches sur pied (5 €/stère) ou façonné frais (22 €/stère), pour autant qu'il soit prêt à façonner, transporter et sécher lui-même le bois. Même si elles sont achetées moins chères lorsqu'elles sont humides, les bûches doivent sécher deux ans avant utilisation (ce qui ramène l'humidité de 50 à 20%).

¹⁶ Les prix de ces combustibles sont négociés au cas par cas et constituent des marchés confidentiels

4 Les technologies de conversion du bois en énergie

Divers procédés existent pour convertir l'énergie que renferment les composants du bois en chaleur utile* ou en électricité. Nous traiterons dans ce document de la pyrolyse, la gazéification et la combustion. Au sein de chacun de ces procédés diverses technologies ont été développées afin de répondre à des applications spécifiques. Seules les applications adaptées au contexte wallon seront détaillées.

La **pyrolyse** est une décomposition – ici du bois - par action de la chaleur. Le bois pyrolysé est chauffé à température moyenne (500 à 700°C) pendant un temps donné et en atmosphère contrôlée (absence d'oxygène). Il est ainsi fractionné en trois produits :

- solides (charbon de bois),
- gazeux,
- gazeux condensables en liquides (huiles pyrolytiques).

La majorité de ces composés est encore combustible. Selon la température à laquelle le bois est soumis, son temps de séjour dans le four et la pression qui y règne, la réaction de pyrolyse sera orientée vers l'obtention préférentielle d'un type de produit. La **pyrolyse flash** vise l'optimisation de la production d'huiles pyrolytiques tandis que la **carbonisation** favorise la formation de charbon de bois.

La **gazéification** est une voie intermédiaire entre la pyrolyse et la combustion. Conduite en présence d'une quantité réduite d'oxygène, la gazéification transforme le bois en un mélange combustible de gaz. Ce dernier est ultérieurement transformé en chaleur et/ou en électricité selon divers moyens : turbines, chaudières ou moteur à combustion interne.

La **combustion** est la voie la plus rapide de valorisation énergétique du bois. En présence d'un excès d'oxygène, le bois est complètement brûlé en libérant une forte quantité de chaleur. Lorsque la combustion se déroule dans une chaudière, la chaleur produite assure la production d'eau chaude à 70-90 °C ou de vapeur. Cette dernière est éventuellement employée pour produire une force motrice et/ou de l'électricité.

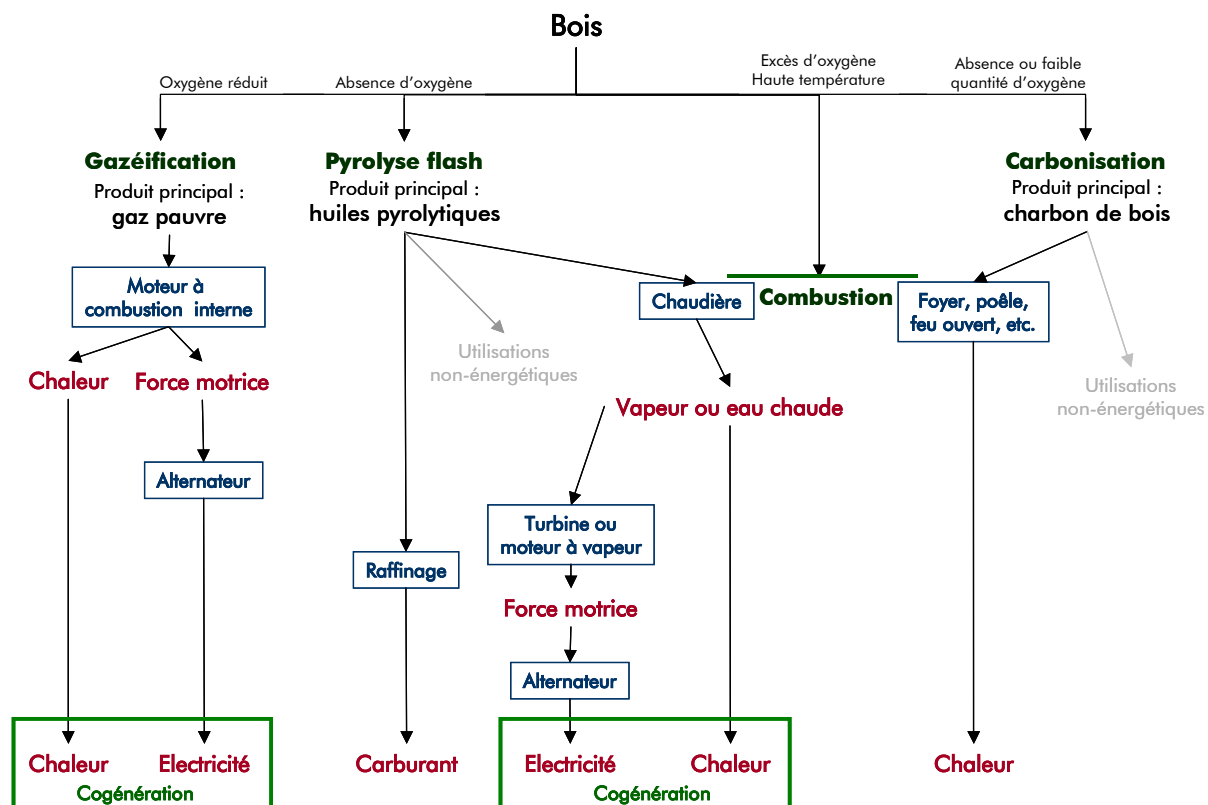


Figure 8: Voies actuelles de valorisation énergétique du bois

Alors que la combustion libère immédiatement sous forme de chaleur l'énergie contenue dans le bois, les autres voies de valorisation ont pour principe de convertir le combustible en un vecteur énergétique plus aisément stockable ou transportable et dont la transformation finale en énergie utile peut être effectuée à un autre moment et à un autre endroit. Ces vecteurs peuvent être solides (le charbon de bois), liquides (les huiles pyrolytiques, raffinées ou non) ou gazeux (le gaz de gazéification).

Ces différentes techniques procurent de l'énergie à partir du bois avec des rendements sensiblement différents. En fonction des besoins caractéristiques de chaque situation, une technologie s'imposera plutôt qu'une autre. Ainsi, en Wallonie, pour la production unique de chaleur, la combustion reste la voie la plus rentable tandis que pour la production simultanée de chaleur et d'électricité - la cogénération - de petite puissance, les meilleurs rendements sont obtenus par gazéification.

5 La pyrolyse flash

La pyrolyse flash consiste à exposer le bois, finement divisé (sciure) à une température d'environ 500°C pendant moins d'une seconde. La réaction de pyrolyse est alors conduite pour la production de liquides. On parlait autrefois de distillation du bois. Lors d'une pyrolyse flash, 60-70 % de la masse initiale de bois anhydre¹⁷ se retrouve sous forme de composés liquides et de composés gazeux condensables en liquide. Ce type de réaction a été fortement développé au début du XX^{ème} siècle, les huiles pyrolytiques servant alors de base à l'industrie chimique (production de méthanol, acide acétique, acétone, etc.). Cette activité est tombée en désuétude avec l'avènement de la pétrochimie et de la chimie de synthèse qui permettent d'obtenir ces mêmes produits à moindres frais. Le méthanol "distillé" à partir de bois a été utilisé dans des moteurs.

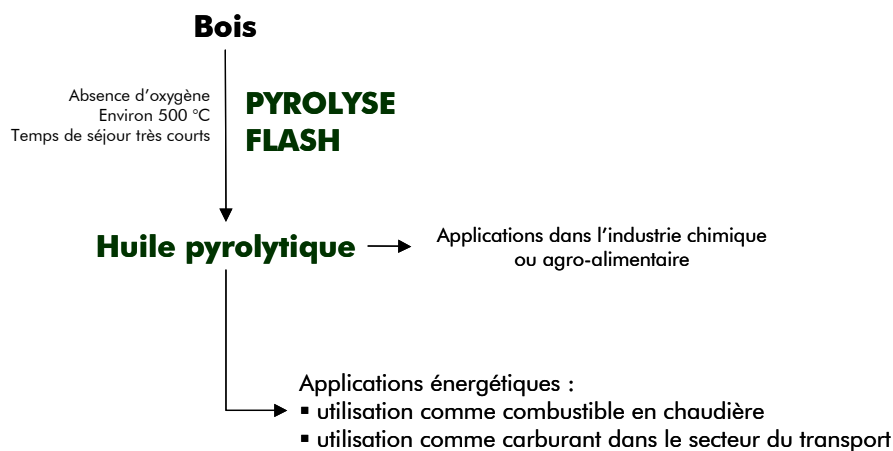


Figure 9 : la pyrolyse flash

Bien qu'à l'heure actuelle les huiles pyrolytiques de bois soient principalement valorisées dans l'industrie agro-alimentaire pour la production d'arômes, portant alors le label "naturel", elles peuvent également servir de combustible dans une chaudière ou, après raffinage, en tant que carburant dans le secteur des transports. L'utilisation énergétique des huiles tire avantage du fait que ce liquide a un contenu énergétique plus important qu'un même volume ou qu'une même masse de bois. De plus, un liquide est plus facilement stockable et transportable qu'un solide hétérogène comme le bois. Ainsi, la production d'huiles pyrolytiques permet de scinder le moment et le lieu d'exploitation du bois de ceux de son utilisation énergétique finale. Ces procédés sont arrivés au stade de projets pilotes industriels mais nécessitent encore des travaux complémentaires d'amélioration (réduction des coûts de production, etc.). Mis à part des équipements de recherches, aucune installation de ce type n'existe en Région wallonne.

¹⁷ Le bois anhydre est un bois ne contenant pas d'eau. Le bois anhydre est une vision théorique ; il ne se rencontre pas naturellement car même le bois sec contient toujours une certaine proportion d'eau (généralement 15-20 % sur masse brute). Les rendements énergétiques des réactions de pyrolyse sont extrêmement tributaires de l'humidité du bois entrant dans le four tandis que le rendement rapporté au bois seul – sans eau, c'est-à-dire anhydre – est, lui, constant pour une technologie donnée. Pour cela, les rendements de pyrolyse sont traditionnellement exprimés en bois anhydre.

6 La carbonisation

Lorsque la pyrolyse vise la production de charbon de bois, on parle de carbonisation. Elle consiste à soumettre le bois à des températures de l'ordre de 500°C, avec un temps de séjour long (quelques heures ou jours) et en présence d'une quantité très faible d'oxygène. D'une humidité de 1 à 10 %, le charbon de bois a un pouvoir calorifique inférieur (PCI*) variant entre 27 et 32 MJ/kg* en fonction de la technique utilisée et du savoir-faire du charbonnier.

Pour obtenir du charbon, il est nécessaire d'apporter au bois de la chaleur. Dans une meule ou dans un four artisanal de carbonisation, celle-ci peut être produite par une combustion partielle du bois à traiter. Dans les systèmes modernes, le bois est placé dans une enceinte close, chauffée de manière externe ou par circulation de gaz chauds. Pour cela, on exploite le plus souvent la chaleur ou les effluents gazeux produits par la réaction elle-même qui, ainsi, s'auto-entretient. Les procédés industriels de production continue de charbon de bois font recirculer les gaz chauds de pyrolyse sur la charge de bois. Notons particulièrement les fours continus Lambiotte, originaires de Wallonie, qui ont connu un large développement à travers le monde.



Figure 10 : Four continu de carbonisation de type Lambiotte

Le charbon de bois est un excellent réducteur. C'est ce qui lui a valu d'être largement utilisé depuis l'Age du Fer pour la fusion et la réduction des minerais métalliques. Les forêts wallonnes ont permis la production de quantités importantes de charbon de bois qui était destiné à alimenter les entreprises sidérurgiques des bassins de la Meuse et de la Sambre. Depuis la généralisation de l'utilisation du coke en sidérurgie, la production de charbon de bois s'est cantonnée aux zones où la main d'œuvre est bon marché et où la ressource en bois est abondante (Afrique, Brésil, etc.).

A l'heure actuelle, plus aucune unité de carbonisation du bois n'est active en Wallonie. Le charbon de bois, à présent utilisé en Belgique pour les barbecues, est importé en totalité. Certains charbons de haute qualité sont parfois encore employés en sidérurgie pour des applications particulières. Notons également la large utilisation des propriétés filtrantes du charbon actif.

La carbonisation a fait l'objet d'un développement industriel à travers le monde.

7 La gazéification

Vielle de plus de deux siècles, la gazéification connaît aujourd'hui un regain d'intérêt. Elle consiste à transformer, à l'aide d'un agent oxydant, un combustible solide – ici le bois - en un mélange gazeux. Celui-ci contient notamment de l'hydrogène (H₂), du mono- et du di- oxyde de carbone (CO et CO₂), un peu d'eau ainsi qu'une quantité variable de goudrons. L'hydrogène et le monoxyde de carbone sont combustibles ; leur teneur dans le gaz régira son pouvoir calorifique. La quantité de goudrons à la sortie du gazogène dépend de la technologie utilisée. Même si les goudrons ont pour effet d'augmenter le PCI* des effluents gazeux, certaines applications nécessitent l'utilisation d'un gaz exempt de goudrons.

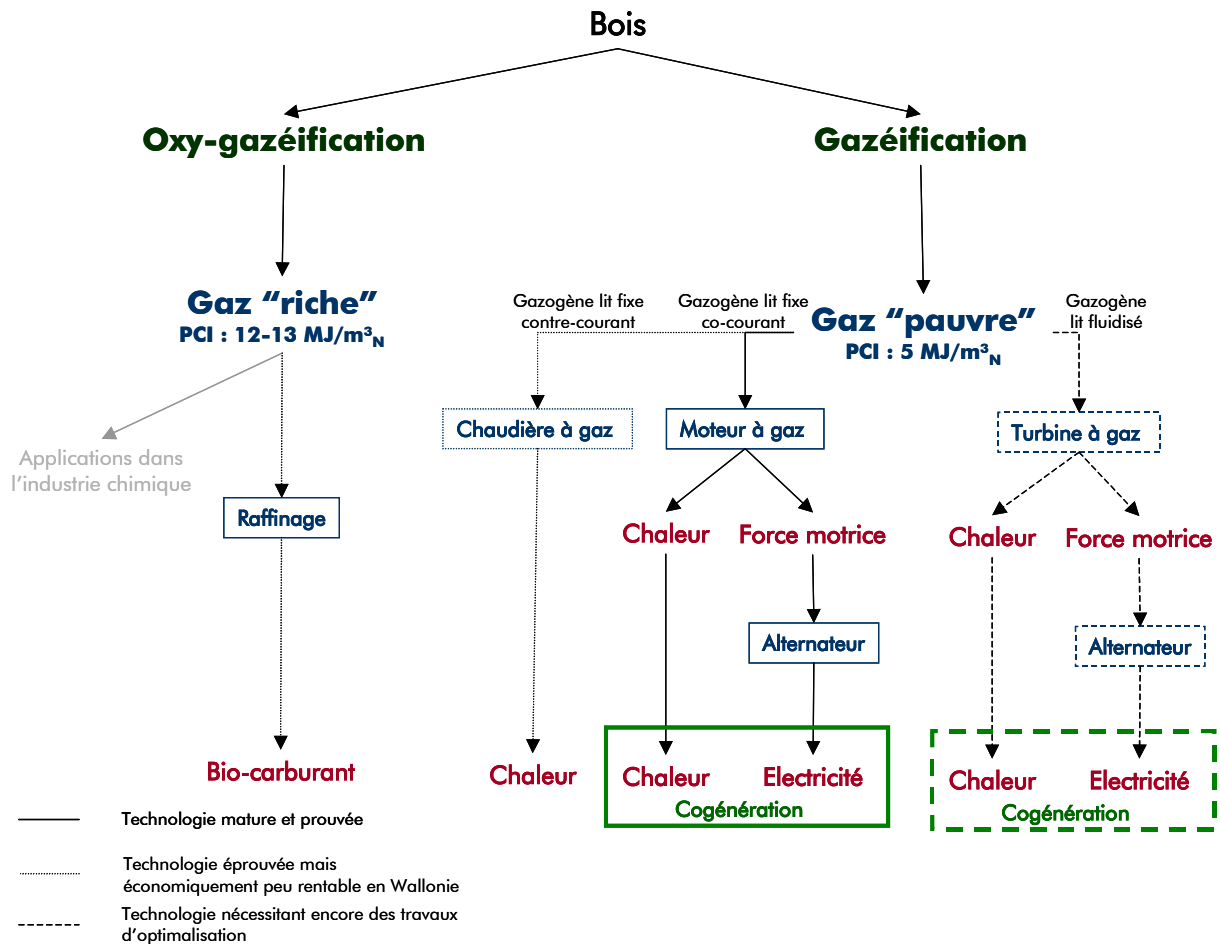


Figure 11 : les différentes technologies de valorisation énergétique du bois par gazéification

7.1 L'oxy-gazéification

Lorsque le bois est gazéifié avec de la vapeur, on parle d'oxy-gazéification. Celle-ci produit un gaz dit "riche", dont le PCI est d'environ 12-15 MJ/m³_N*. Raffiné, le gaz riche sert de base à la production de biocarburants (H₂, méthanol, etc.). Bien que tout à fait maîtrisés, ces procédés ne sont pas encore arrivés à maturité industrielle et en sont à l'heure actuelle au stade d'installations pilotes.

Le gaz riche trouve aussi des applications non-énergétiques dans l'industrie chimique (production de méthanol par exemple). A l'heure actuelle, aucune exploitation industrielle de ce type n'est développée en Région wallonne.

7.2 La gazéification à l'air

A cause de la présence d'azote, la gazéification à l'air produit un mélange gazeux moins énergétique, appelé "gaz pauvre" et dont le PCI atteint environ 5 MJ/m³_N. La gazéification à l'air est un procédé beaucoup moins lourd à mettre en oeuvre que l'oxy-gazéification et demande des investissements moins importants. Des unités de petites et moyennes dimensions sont à ce jour économiquement rentables.

Différentes technologies de gazogènes à bois existent. Selon la manière avec laquelle le combustible évolue dans le réacteur, on parle de gazogènes à lit fixe ou à lit mobile.

Gazogènes à lit mobile (lit fluidisé et lit entraîné)

Dans ce type, on retrouve principalement les procédés de gazéification à *lit fluidisé*. Ce sont des technologies réservées aux combustibles pulvérulents et ce, pour des installations de grande puissance. L'utilisation en turbines du mélange gazeux généré par gazéification à lit fluidisé est actuellement étudiée pour la production d'électricité mais cette technique ne fait pas encore l'objet d'un développement commercial.

Gazogènes à lit fixe

Ce sont les gazogènes les plus simples. Selon les trajets du gaz oxydant et du mélange gazeux généré, les réacteurs sont dits à *co-courant* ou à *contre-courant*. Chacune de ces technologies est caractérisée par la production d'un mélange gazeux particulier. Dès lors, selon l'utilisation prévue du gaz, une technologie de gazéification sera plus indiquée qu'une autre.

Les gazogènes à *contre-courant* produisent un mélange gazeux encore riche en goudrons et valorisable avec de bons rendements dans une chaudière pour la production d'eau chaude ou de vapeur.

Ces gazogènes sont de conception très simple mais cette technique arrive difficilement en concurrence avec les filières de combustion directe du bois en chaudière. Les gazogènes à contre-courant sont parfois utilisés en complément d'installations existante au mazout ou au gaz

Enfin, le gaz pauvre de gazéification est employé comme carburant seul ou en mélange dans des moteurs à combustion interne. L'arbre moteur, couplé à un alternateur, génère de l'électricité tandis que la chaleur récupérée du circuit de refroidissement et de l'huile du carter assure la production d'une quantité importante d'eau chaude, voire de vapeur. L'utilisation en moteur sous-entend l'emploi d'un gaz exempt de goudrons. Les technologies à contre-courant ne sont donc pas adaptées à ce type d'application. Les gazogènes à co-courant produisent par contre un mélange gazeux dont la teneur en hydrocarbures légers est plus faible mais un nettoyage des gaz restera tout de même nécessaire.

Tableau 7 : Principales technologies de gazéification du bois
(Source : ITEBE 2003)

	Avantages	Inconvénients
Lit fixe co-courant	<ul style="list-style-type: none"> ▪ simple de conception et éprouvé pour certains combustibles ▪ simple de construction ▪ taux de conversion élevé ▪ gaz relativement propre si combustible approprié 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nécessité d'un combustible homogène et de taille significative ▪ taille des installations limitée (350 kW_{él}) ▪ nécessité d'utiliser un combustible de faible humidité ▪ coûts de maintenance élevés
Lit fixe contre-courant	<ul style="list-style-type: none"> ▪ construction simple et robuste ▪ rendement thermique élevé ▪ plus grande souplesse vis-à-vis de l'humidité du combustible 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ faible température des gaz en sortie avec risque de condensation ▪ gaz très chargés en goudrons ▪ inadapté à la production d'électricité
Lit fluidisé dense	<ul style="list-style-type: none"> ▪ construction relativement simple et opérationnelle 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ taille minimale pour être économique (20 MW_{él}) ▪ taux de particules élevé dans les gaz ▪ taux de goudrons dans les gaz modéré à élevé
Lit fluidisé circulant	<ul style="list-style-type: none"> ▪ grande tolérance par rapport au combustible (type, taille, etc.) ▪ taux de goudrons modéré dans les gaz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ taille minimale pour être économique (20 MW_{él}) ▪ taux de particules élevé dans les gaz

7.3 Application en Région wallonne : la cogénération par gazéification de bois

En Région wallonne, la gazéification du bois offre une solution compétitive par rapport à la combustion lorsqu'elle vise la production simultanée de chaleur et d'électricité (aussi appelée la cogénération) dans des gammes de puissance comprises entre 300 et 1000 kW_{él}. Au-delà de cette puissance, les turbines vapeurs sont plus adaptées. Il s'agit alors traditionnellement de gazogènes à lit fixe et à co-courant avec utilisation des gaz en moteur.

Ce genre d'installation est fabriquée en Région wallonne ; des unités sont actuellement en cours d'installation sur le territoire wallon, d'autres sont à l'études.

La production combinée d'électricité et de chaleur exploitable s'appelle la cogénération. L'avantage de la co-génération est qu'elle offre un meilleur rendement total pour une même puissance délivrée en chaleur et en électricité que si ces productions étaient séparées. Il faudra donc moins de combustible pour produire la même quantité d'énergie.

Le système wallon de soutien à la production d'électricité verte* (système des Certificats verts¹⁸) est conçu de manière telle que l'aide octroyée à une installation de cogénération dépend de la quantité de chaleur récupérée et utilisée. Pour être rentable, une unité de cogénération à partir de biomasse doit donc se trouver à proximité d'une source de biomasse mais aussi d'un utilisateur potentiel de chaleur. Dans cette optique, le dimensionnement d'une telle installation sera prévu de manière à ce qu'un maximum de la chaleur produite soit valorisée. L'aide obtenue par kW_{él} produit sera maximale.

Cogénération par gazéification de bois : la technologie modulaire proposée par la société Xylowatt.

Le bois, broyé en plaquettes, est stocké dans un silo dont la taille définit l'autonomie de l'installation. En fonction des besoins énergétiques, le combustible est acheminé au gazogène par un convoyeur. A la sortie du réacteur, les effluents gazeux doivent être refroidis et lavés pour éliminer l'eau, les cendres et les restes de goudrons du mélange avant d'être utilisés dans les groupes moteurs. L'électricité générée par les modules de cogénération est utilisée sur le site même d'exploitation et le surplus est revendu au réseau électrique moyenne tension. L'eau chaude produite au niveau du bloc moteur est véhiculé par un réseau de canalisations isolées vers les applications utilisatrices de chaleur (chauffage, séchage, procédé agro-alimentaire, etc.).

Chaque étape du processus est surveillée par un ensemble de capteurs qui rendent possible l'informatisation complète de l'installation et sa télégestion. Ces unités demandent tout de même une importante main d'œuvre qualifiée pour le nettoyage régulier du gazogène.

Lorsqu'elles fonctionnent de manière optimale, les centrales de cogénération par gazéification à co-courant ont un rendement énergétique de l'ordre de 75 %¹⁹, avec une production d'énergie thermique deux fois plus importante que la production d'électricité. Cela signifie que, avec 1 kg de bois anhydre (5 kWh), l'installation produira 2,48 kWh d'électricité et 1,25 kWh de chaleur, soit 3,73 kWh d'énergie utile.

¹⁸ Pour plus d'informations sur le système des Certificats verts, visitez le site de la Commission wallonne pour l'Énergie (CWAPE) : <http://www.cwape.be>

¹⁹ calculé sur base de bois anhydre

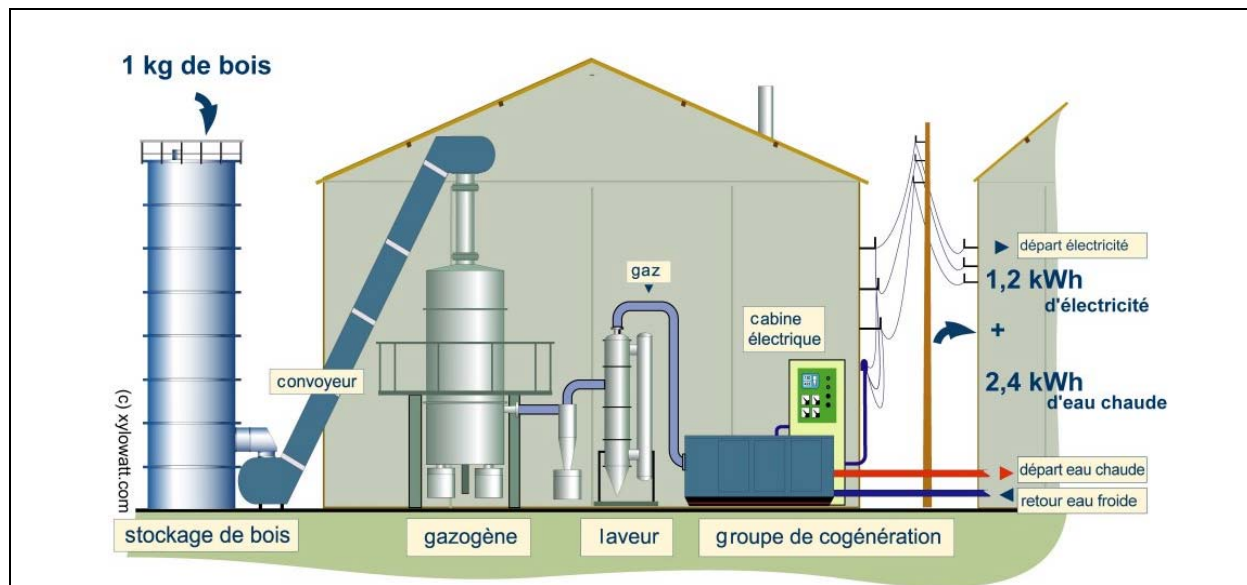


Figure 12 : Schéma d'une installation de cogénération par gazéification de bois
(Source : Xylowatt)

La qualité du gaz – et donc le rendement de la gazéification – sont tributaires de l'humidité du combustible. Lorsque celle-ci dépasse 20% sur masse brute, les performances de l'installation peuvent diminuer significativement. Parce qu'elle régit la distribution des gaz au sein du gazogène, la granulométrie des plaquettes de bois entrant dans le système doit également être bien adaptée sous peine de produire un mélange gazeux de mauvaise qualité.

Vu son relativement faible contenu énergétique, il n'est pas économiquement rentable de transporter le gaz pauvre - même comprimé – sur de longues distances.

8 La combustion

8.1 Principes généraux de la combustion

La combustion consiste en une oxydation complète et très rapide du bois libérant immédiatement une importante quantité de chaleur. Lors de la combustion, l'énergie accumulée dans le bois est libérée instantanément sous forme de chaleur.

Le processus se déroule en plusieurs phases :

- **séchage** : grâce à la chaleur du foyer, l'eau encore contenue dans le bois s'évapore ;
- **pyrolyse** : sous l'action de la chaleur, les constituants du bois se décomposent en gaz et en fines gouttelettes de goudrons qui se vaporisent. La majorité de ces composés gazeux sont combustibles. La décomposition laisse un résidu carboné ;
- **combustion des gaz** : dès qu'ils s'échappent de la pièce de bois, les gaz de décomposition se combinent à l'oxygène et brûlent (flamme) ;
- **combustion du résidu carboné** : lorsque les gaz se sont dégagés, le résidu carboné brûle (incandescence des braises).

Plus la pièce de bois est de dimensions importantes, plus ces 4 étapes se chevauchent: les différents constituants du bois se décomposent alors que toute l'eau ne s'est pas évaporée, le résidu carboné brûle avant que tous les composés gazeux soient libérés.

Tant que des gaz se dégagent du combustible, la température de celui-ci reste voisine de 800°C tandis que les flammes avoisinent les 1300°C. Lorsque les gaz se sont dégagés, le résidu carboné brûle aux environs de 1000°C. Il est nécessaire que l'intérieur du foyer atteigne au moins 800°C pour permettre une bonne décomposition du combustible.

8.2 Principaux paramètres influençant la combustion

L'air

Contrairement aux autres voies de valorisation énergétique du bois, la combustion se déroule en présence d'air en excès.

L'air est nécessaire à deux niveaux :

- pour brûler le résidu carboné et les gaz au niveau du lit, **l'air primaire**
- pour brûler les gaz combustibles au dessus du lit, **l'air secondaire**

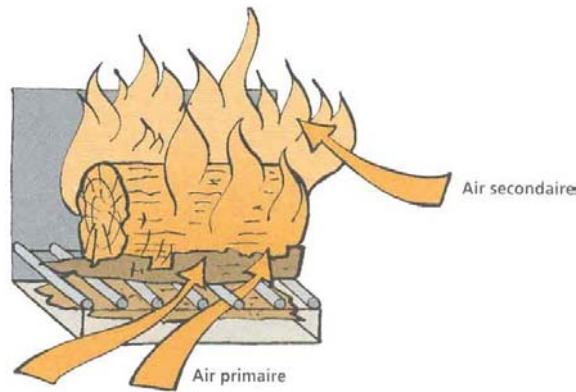


Figure 13 : Alimentation de la combustion en air primaire et secondaire
(source : Office Fédéral de l'Energie 1998)

La régulation de la quantité d'air injectée dans le foyer est importante. Elle affecte grandement la qualité de la combustion. Si l'arrivée d'air est insuffisante, la combustion des gaz sera incomplète. Il est facile de calculer la quantité exacte d'air nécessaire à la combustion du bois. Ce chiffre reste cependant théorique ; la répartition de l'air comburant est impossible à réaliser parfaitement autour du combustible. Dans la pratique, on apporte une quantité d'air supérieure aux besoins, un excès d'air.

$$\text{excès d'air} = \frac{\text{air réellement amené}}{\text{air théoriquement nécessaire}}$$

Il faut toutefois garder à l'esprit qu'un trop grand excès d'air mène également à une baisse de rendement et à des émissions d'imbrûlés. Il faut donc trouver l'optimum dans la quantité d'air à apporter.

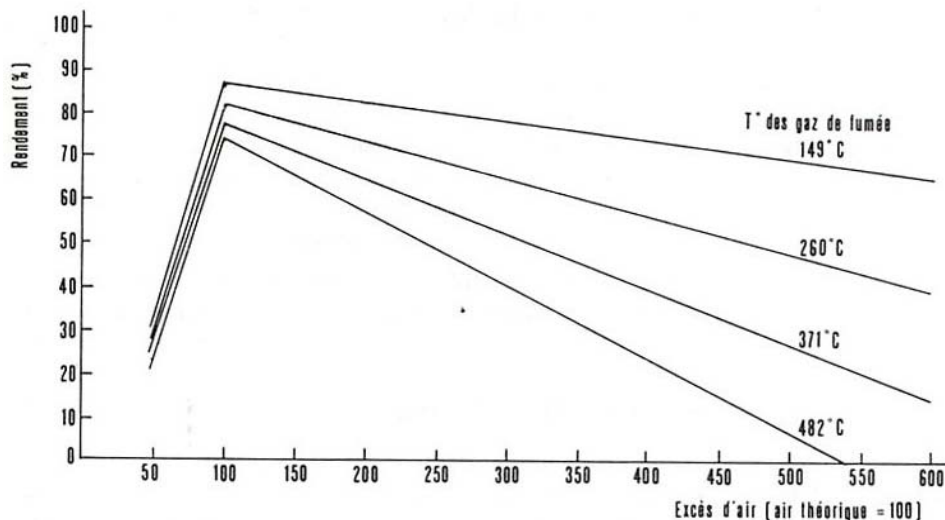


Figure 14 : Rendement de la combustion du bois en fonction de l'excès d'air et de la température des fumées.
(Source : Maxwell et al. 1981 dans Carré et al. 1991)

L'humidité du combustible

Le bois, même sec en apparence, contient une certaine quantité d'eau. Elle varie en fonction de l'essence, du conditionnement et du temps de séchage.

Plus le bois que l'on introduit dans le foyer est humide, plus il faudra utiliser de l'énergie pour évaporer cette eau. Il en résulte une baisse de la température de la chambre de combustion et par conséquent, une moins bonne décomposition thermique du bois. De plus, la vapeur d'eau produite augmente significativement le volume des gaz. Leur vitesse de passage s'en trouve augmentée, les gaz combustibles ont ainsi moins le temps de se combiner à l'oxygène de l'air et de brûler complètement.

La dimension et la nature du combustible

Etant donné les mécanismes de la combustion du bois, plus le combustible-bois sera débité en fins morceaux – c'est-à-dire présentant une plus grande surface pour la même masse –, plus les gaz de décomposition se dégageront facilement. Il en va de même pour les essences les plus poreuses. Ces deux paramètres influencent donc la vitesse de combustion. Cependant, lorsque la granulométrie du combustible est trop fine, comme dans le cas de la sciure, la circulation d'air ne peut se faire correctement et la combustion se déroule avec difficulté.

8.3 La combustion du bois pour la production de chaleur

Depuis des temps immémoriaux, l'homme tire avantage de la chaleur dégagée par la combustion du bois. D'abord exploitée pour le chauffage et la cuisson des aliments, elle a ensuite été largement employée pour alimenter en chaleur des procédés industriels.

Alors qu'elle se déroulait traditionnellement dans des foyers ouverts, la combustion du bois à des fins domestiques a été au fil des siècles de mieux en mieux contrôlée au sein de foyers clos.

A l'heure actuelle, la combustion du bois est exploitée soit directement par flux d'air chaud, soit par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur, porté à température dans une chaudière. Ces deux voies sont largement utilisées dans les gammes de puissance faible par les particuliers ou, pour des puissances plus élevées, dans les entreprises.

8.3.1 Petites puissances : chauffage domestique

Dans des gammes de puissance allant de 3 à 100 kW, le bois reste toujours très apprécié pour le chauffage domestique.

Les appareils individuels de chauffage

Avec **les appareils individuels de chauffage** : feux ouverts, encastrables et poêles, la chaleur dégagée par la combustion est directement délivrée à une ou plusieurs pièces d'habitation. La puissance de ces appareils dépasse rarement 15kW.

Nous ne traiterons pas dans ce document de la cuisson à l'aide de cuisinières à bois, procédé devenu anecdotique en Région wallonne.

Les feux ouverts (âtres) sont les systèmes les plus rudimentaires de chauffage au bois. La combustion s'y déroule sans aucun contrôle de l'arrivée d'air, avec de très mauvais rendements. De plus, une grande partie de la chaleur produite n'est pas valorisée et s'échappe par la cheminée. Les feux ouverts offrent cependant une convivialité inégalée.

Dans le cas des **encastrables**, la combustion est ceinte dans un foyer en acier ou en fonte, inséré dans une cheminée. Selon que l'appareil soit encastré dans une cheminée pré-existante ou, au contraire, habillé par une maçonnerie imitant une cheminée, on parle respectivement d'**inserts** ou de **foyers fermés**. Les encastrables ont pour avantage d'exploiter l'esthétisme d'une cheminée tout en ayant de bons rendements.

Les **poêles** sont constitués d'un foyer fermé en acier ou en fonte, non-inséré dans la maçonnerie de la cheminée, en restant connectés au conduit d'évacuation des fumées. Dans les poêles à bûches, comme dans les encastrables, la combustion reste visible à travers une vitre. Ces appareils constituent un excellent compromis entre des rendements devenus aujourd'hui très bons et la convivialité du chauffage au bois. Les poêles sont utilisés avec du bois sous forme de bûches ou, éventuellement, avec des bûchettes de bois densifié.

Les poêles de masse sont des appareils d'un poids considérable – de plus d'une tonne – entièrement construits en matériaux accumulant la chaleur. Au sein du poêle, les fumées chaudes d'un feu de bûches circulent dans un réseau de conduits en livrant un maximum de la chaleur au matériau avant d'être évacuées par la cheminée. La chaleur ainsi accumulée est restituée à l'habitation parfois jusque 24 heures après l'extinction du feu.



Figure 15 : Poêle de masse en stéatite
(source : Tulikivi 2004)

Brûlant exclusivement des granulés de bois, les **poêles à pellets** sont d'un rendement très élevé, entre 80 et 85%. Les granulés sont contenus dans un réservoir situé au-dessus, à côté ou derrière le foyer. Une vis sans fin introduit le combustible jusqu'au brûleur où a lieu la combustion. Grâce à des techniques d'alimentation automatique en combustible et en air comburant, la régulation de la combustion en fonction de la demande en chaleur est particulièrement performante. D'une capacité de 25 à 40 kg de granulés, ces poêles ont une autonomie de plusieurs heures à quelques jours en fonction du volume du réservoir et de la demande de chaleur. Leur utilisation est entièrement automatique, gérée électroniquement. Ce sont des poêles d'un très grand confort.

Le chauffage central au bois

A côté de ces appareils individuels, le bois peut également assurer le chauffage d'une habitation par un système centralisé. **Le chauffage central au bois** fonctionne selon le même principe qu'une installation au mazout ou au gaz. Au sein de la chaudière, les gaz de combustion chauffent un fluide caloporteur (le plus souvent de l'eau), circulant dans un réseau de canalisations. La chaleur ainsi véhiculée est ensuite restituée dans les différentes pièces de l'habitat par des systèmes d'échange de chaleur (radiateurs, chauffage par le sol, aérotherme, etc.). Les chaudières domestiques au bois ont des puissances allant généralement de 15 à 100 kW.

La chaudière peut également assurer la production d'eau chaude sanitaire. Un ballon accumulateur permet de parfaire l'adéquation entre les besoins en eau et un fonctionnement optimal de l'installation. En effet, les chaudières au bois doivent idéalement être utilisées à puissance nominale* c'est-à-dire au régime pour lequel elles ont été dimensionnées. En sous-régime, les rendements chutent fortement tandis que le sur-régime réduit considérablement la durée de vie du foyer.

Les plus anciennes chaudière au bois sont **les chaudières à bûches**. Leurs rendements se sont fortement améliorés ces dernières années, principalement grâce aux technologies de combustion inversée. Elles nécessitent cependant une manutention importante pour recharger le foyer en bûches.

Grâce à une certaine fluidité du combustible, **les chaudières à pellets ou à plaquettes** sont, elles, entièrement automatiques. Dans ces installations, le bois est acheminé d'un silo jusqu'au brûleur par un système d'alimentation. Il peut s'agir de vis sans fin ou d'un système d'aspiration.

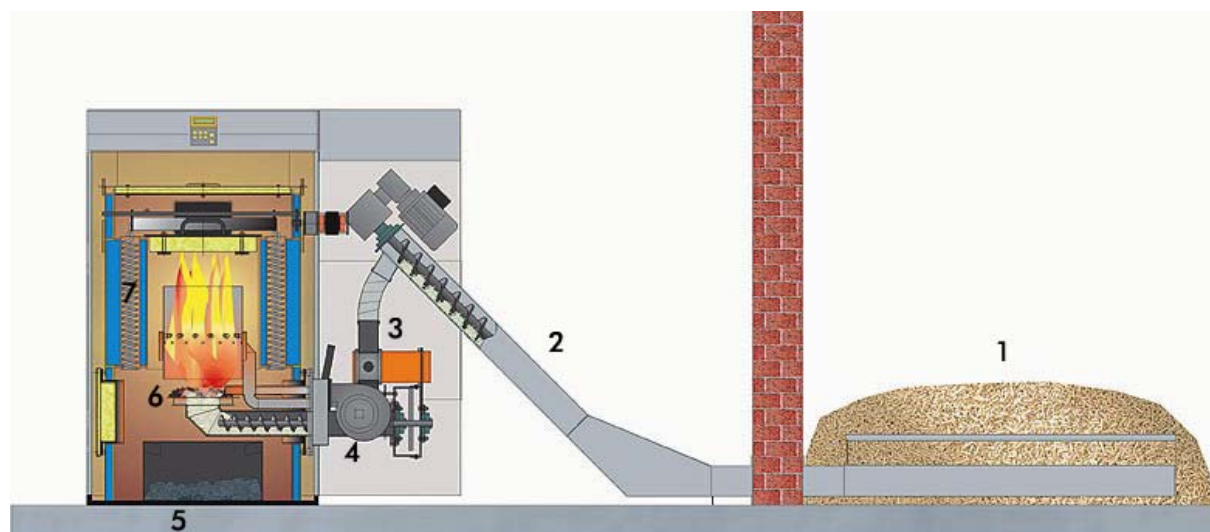


Figure 16: Chaudière automatique à granulés de bois

1: silo de stockage des pellets, 2: vis d'extraction du combustible, 3: système de sécurité incendie, 4: ventilateur pour l'air primaire et secondaire, 5: cendrier, 6: brûleur, 7: chauffage de l'eau par tubes de fumée – système automatique de nettoyage des tubes (Source : Ökofen 2004)

Vu leur densité énergétique* relativement importante, les pellets mobilisent un faible volume de stockage. Une réserve de 6m³ de granulés peut assurer l'autonomie d'une maison uni-familiale bien isolée pendant presque un an. Le silo d'alimentation peut prendre diverses formes : un espace réservé de la cave, une structure souple démontable ou encore une citerne enterrée.

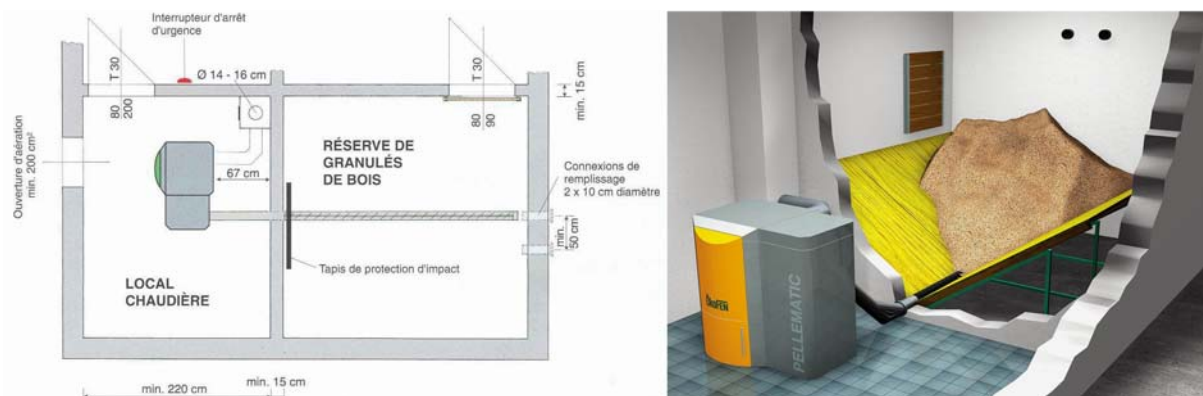


Figure 17 : Chaudière automatique à pellets et exemple d'intégration du silo de stockage dans l'habitat (Source : Ökofen 2004)

Combustible foisonnant, les plaquettes de bois occupent au contraire un volume relativement important et demandent un espace considérable de stockage, idéalement abrité (grange, hangar, etc.). Les chaudières automatiques à plaquettes sont plus adaptées au milieu rural, tandis que celles à pellets peuvent sans problème s'envisager en zone urbaine ou péri-urbaine.

Dans ces installations, l'alimentation en combustible et en air de combustion sont régulées électroniquement en fonction de la demande en chaleur et ce pour un rendement optimal. Ces sont des systèmes entièrement automatiques. Leur confort d'utilisation est quasi identique aux chauffages centraux au mazout ou au gaz mais leur prix est pour l'instant encore élevé.

Pour plus d'information à ce sujet :
"Le chauffage au bois pour les particuliers" édité par la DGTR.

8.3.2 Grandes puissances : applications dans les entreprises et le secteur tertiaire

En augmentant les dimensions du foyer, les chaudières à bois peuvent fournir des puissances énergétiques allant jusque plusieurs dizaines de MW. Les chaudières au bois procurent de la chaleur pour le chauffage de bâtiments ou pour assurer un processus industriel (séchage de bois, agro-alimentaire, etc.).

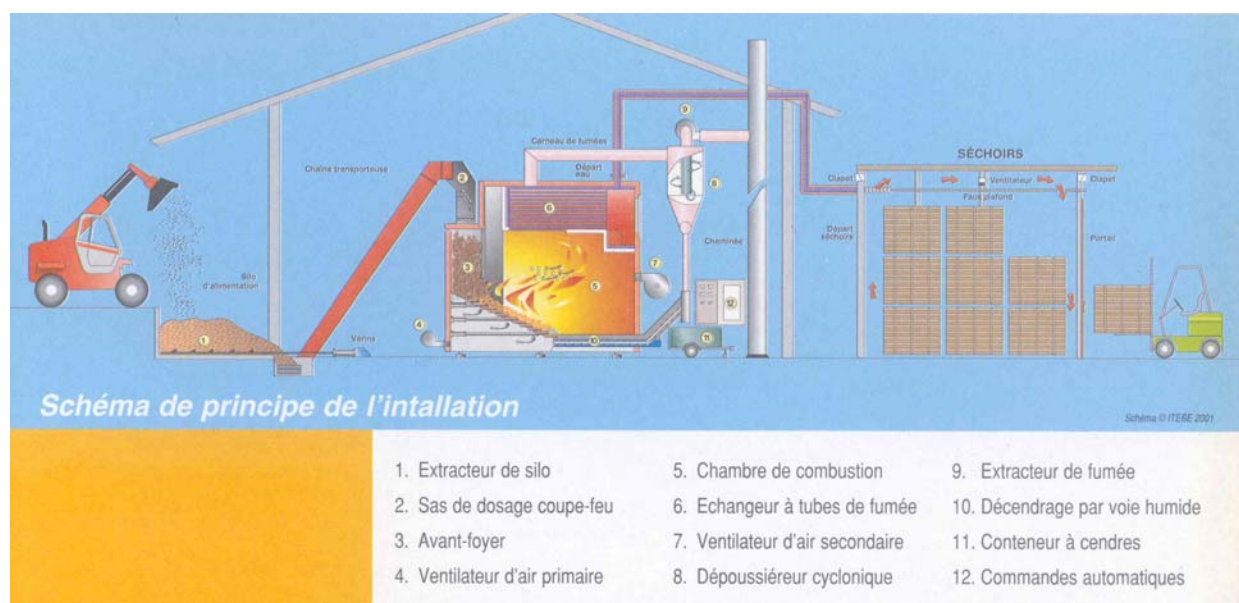


Figure 18 : schéma d'une chaufferie à biomasse pour le séchage de bois
 (Source : ITEBE)

Quelle que soit l'utilisation finale de la chaleur produite, les chaufferies au bois présentent toutes le même schéma général. Elles sont constituées :

- d'un silo d'alimentation et éventuellement de stockage,
- d'un système de transfert et d'alimentation,
- de la (ou des) chaudière(s), composée(s) elles-même
 - du foyer proprement dit
 - d'un système d'échange de chaleur vers un fluide caloporteur,
- d'un système d'évacuation des fumées
- d'un système d'évacuation des cendres.

Silos d'alimentation & systèmes de transfert et d'alimentation

Le silo d'alimentation jouxte la chaudière ; il peut s'agir d'une fosse, d'un silo maçonné ou d'un conteneur. Diverses possibilités existent pour acheminer le combustible du silo au foyer de la chaudière. Dans un premier temps, des mécanismes brassent le combustible dans le fond du silo pour l'entraîner vers le système d'alimentation proprement dit. Ce sont des racloirs hydrauliques, des pales, etc. De là, une vis sans fin, un convoyeur à bande, un système d'aspiration voire un grappin transfère le combustible jusqu'à la chaudière pour être introduit dans le foyer.



Figure 19 : Silo d'alimentation aménagé dans un conteneur

Si la chaufferie est alimentée en flux tendu, seul un silo d'alimentation sera nécessaire. Celui-ci est alimenté au fur et à mesure des besoins de la chaudière soit par livraisons en camion soit à partir de l'exploitation même si la chaufferie se trouve sur le lieu de production du combustible-bois. Cette organisation en flux tendu est financièrement avantageuse car elle ne demande pas la mobilisation d'un espace de stockage. Elle pose toutefois le problème de la sécurité d'approvisionnement.

La fourniture en combustible peut au contraire être assurée de façon périodique par des livraisons de quantités de combustible garantissant toute ou une grande partie de la saison de chauffe. Ce système, plus sécurisant, nécessite toutefois la construction d'une zone de stockage, idéalement abritée (hangar, silo, fosse, etc.) et demande une manutention supplémentaire pour remplir périodiquement le silo d'alimentation.

La livraison se fait par tracteur agricole, par camion à benne, porte conteneur, semi-remorque ou par camion souffleur pour les granulés.



Figure 20 : alimentation de la chaudière par vis sans fin

Foyers

En fonction des applications recherchées et surtout des caractéristiques du combustible à brûler, de nombreux types de foyers ont été développés pour les chaudières à bois. Concernant les installations de grande puissance, retenons principalement les foyers à lit fixe et ceux à lit fluidisés.

a) foyers à lit fixe

Dans cette catégorie on retrouve les foyers à alimentation par le bas et les foyers à grille qui sont les plus largement répandus.

Les foyers à grille permettent de brûler du bois aux caractéristiques variées (forme, humidité, etc.). L'air primaire passe à travers une grille, sur laquelle est déposée le lit de combustible, alimentant les phases de séchage, de pyrolyse et de combustion du charbon. L'air secondaire est, lui, injecté au dessus du foyer poussant la combustion des fumées à se dérouler dans une zone séparée de la chaudière (zone dite de "post-combustion").

Les foyers à grilles fixes sont les plus rudimentaires (figure 13) et sont employés pour les petites chaudières à bûches ou à plaquettes. Dans les systèmes modernes, la grille est animée de mouvements destinés à faire évoluer le lit de combustible du système d'alimentation jusqu'au bac de récolte des cendres.

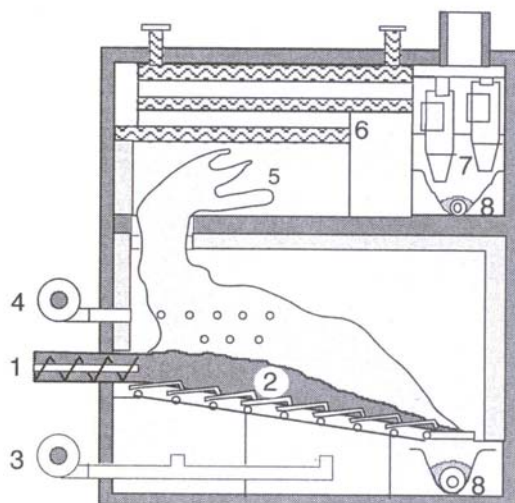


Figure 21 : Chaudière à grille mobile

1: système d'alimentation du combustible, 2: grille mobile, 3: alimentation en air primaire, 4: alimentation en air secondaire, 5: zone de post-combustion, 6: échangeur de chaleur, 7: épuration des fumées (multicyclones), 8: évacuation des cendres au niveau du cyclone et de la grille (source : Nussbaumer T., et al. 2003.)

b) foyers à lit fluidisé

Dans ce type de foyers, le combustible à l'état pulvérulent est brûlé avec un lit de matière inerte et caloporteur (le plus souvent du sable, de la silice, ou de la dolomite), en suspension dans l'air de combustion. Ce sont des installations dont les performances ne sont intéressantes que pour des puissances de plus de 30 MW.

Tableau 8 : avantages et inconvénients des foyers à grille et à lit fluidisés
(Source : CRA-W)

	Avantages	Inconvénients
Chaudière à grille	<ul style="list-style-type: none"> possibilité de brûler des combustibles d'une humidité jusqu'à 60 % possibilité de brûler des combustibles de grande taille facile à opérer 	<ul style="list-style-type: none"> contrôle de l'air difficile réponse lente aux variations de charge de vapeur coûts élevés de construction et de maintenance du réfractaire tapissant le foyer
Chaudière à lit fluidisé	<ul style="list-style-type: none"> capable de brûler des combustibles très humides (60%) ou de faible pouvoir calorifique haut rendement 	<ul style="list-style-type: none"> soin particulier à donner aux émissions de particules fonctionnement demandant une main d'œuvre très qualifiée

Echangeurs de chaleur et fluides caloporteurs

Avant de quitter la chaudière, les fumées transfèrent leur chaleur à un fluide caloporteur. En fonction des utilisations prévues, le fluide caloporteur sera :

- **de l'eau chaude** : le plus souvent utilisé pour le chauffage de bâtiments où il n'y a pas besoin de vapeur pour assurer un process industriel ;

- **de l'air chaud** : parfois employé pour le chauffage d'espaces tels des ateliers à l'aide d'un aérotherme intégré à la chaudière ou de plusieurs répartis dans différentes pièces et alimentés par un réseau de gaines ;
- **de la vapeur** : les températures des fumées sont suffisamment hautes que pour porter l'eau d'un circuit à l'état de vapeur. La vapeur convient pour le chauffage de grands complexes ; elle est également employée pour assurer des procédés industriels spécifiques. De plus, seule la vapeur permet la production de force motrice.
- **de l'huile thermique** : ces fluides offrent l'avantage de véhiculer de la chaleur à des températures de 200 à 300 °C à des pressions relativement faibles, économisant ainsi le surcoût d'installations haute pression.

Les échangeurs de chaleur fumées chaudes/fluide caloporteur sont soit "à tubes de fumée" ou "à tubes d'eau". Ils sont souvent intégrés dans la carrosserie de la chaudière.



Figure 22 : Chaudière à plaquette de bois
Le foyer à grille mobile est visible en bas et l'échangeur à tubes de fumées dans la partie supérieure

Les échangeurs à tubes de fumées sont constitués de canalisations insérées dans un réservoir d'eau, dans lesquelles circulent les fumées chaudes. Dans les échangeurs à tubes d'eau, par contre, les fumées circulent autour de canalisations d'eau. Le transfert de chaleur est assuré par de multiples passages des fumées dans l'échangeur.

Pour les installations de petite puissance, les deux types d'échangeurs conviennent alors que les échangeurs à tubes d'eau sont plus adaptés aux puissances élevées et particulièrement pour la production de vapeur.

Système d'évacuation des fumées

Lorsque les fumées ont fini de transférer leur chaleur au fluide caloporteur, elles sont évacuées vers l'extérieur via le conduit de cheminée. L'extraction des fumées est assurée par la dépression maintenue au niveau du foyer à l'aide de ventilateurs.

Les fumées de combustion du bois sont souvent chargées en particules. Ils s'agit de sels minéraux et de cendres emportées dans les fumées suite aux importants flux d'air à l'intérieur du foyer (les cendres "volantes"). Pour éviter l'émission de ces particules dans l'atmosphère, il existe différentes techniques d'épuration dont les plus répandues sont les multicyclones, les électrofiltres et les filtres à manches. Mis à part les cyclones, ces systèmes de filtration des fumées sont généralement coûteux. De ce fait, ils ne sont envisageables que dans les chaufferies de grande puissance.

Système d'évacuation des cendres

Les cendres sont le résidu de la combustion ; elles sont principalement constituées des minéraux contenus naturellement dans le bois. Pour autant que la chaufferie n'utilise que du bois non traité, les cendres ne sont pas nocives pour l'environnement. Elles sont collectées d'une part au niveau du foyer et d'autre part au niveau du système de filtration des particules.

Les cendres sont acheminées vers un conteneur qui doit être vidé selon une périodicité dépendant de la capacité du collecteur, de l'utilisation de la chaufferie, et du taux de cendres du combustible. Elles sont transportées telles quelles ou sous forme de pâte par adjonction d'eau pour éviter leur dispersion dans l'air.



Figure 23 : Chaudière à plaquettes de bois avec, en premier plan, le conteneur de collecte et d'évacuation des cendres

8.3.3 Les chaufferies collectives et les réseaux de chaleur

L'exploitation de la chaleur produite par la chaudière ne doit pas nécessairement se faire sur les lieux même de la chaufferie et elle n'est pas non plus réservée à un seul utilisateur. Le fluide caloporteur est en effet facilement transportable jusqu'à des distances de quelques kilomètres sans pertes trop importantes d'énergie.

Ces réseaux de chaleur sont constitués de canalisations en acier ou en polyéthylène entouré d'une gaine isolante en laine de roche ou en mousse de polyuréthane selon les caractéristiques du fluide transporté. Le plus souvent enterrés, les réseaux de chaleur sont composés d'un réseau primaire lié à la chaudière et d'autant de réseaux secondaires qu'il y a d'utilisateurs finaux de la chaleur.



Figure 24 : conduites isolées pour réseaux de chaleur

En fonction de l'utilisation escomptée de la chaleur (chauffage, eau chaude sanitaire, procédé industriel comme le séchage du bois, etc.), chaque réseau secondaire est susceptible de véhiculer un fluide aux caractéristiques propres (température, pression). Au niveau de chaque réseau secondaire, un compteur mesure la quantité d'énergie utilisée. Pour l'utilisateur final, rien ne change si ce n'est qu'il ne doit plus se charger de l'entretien de la chaudière ni de l'approvisionnement en combustible.

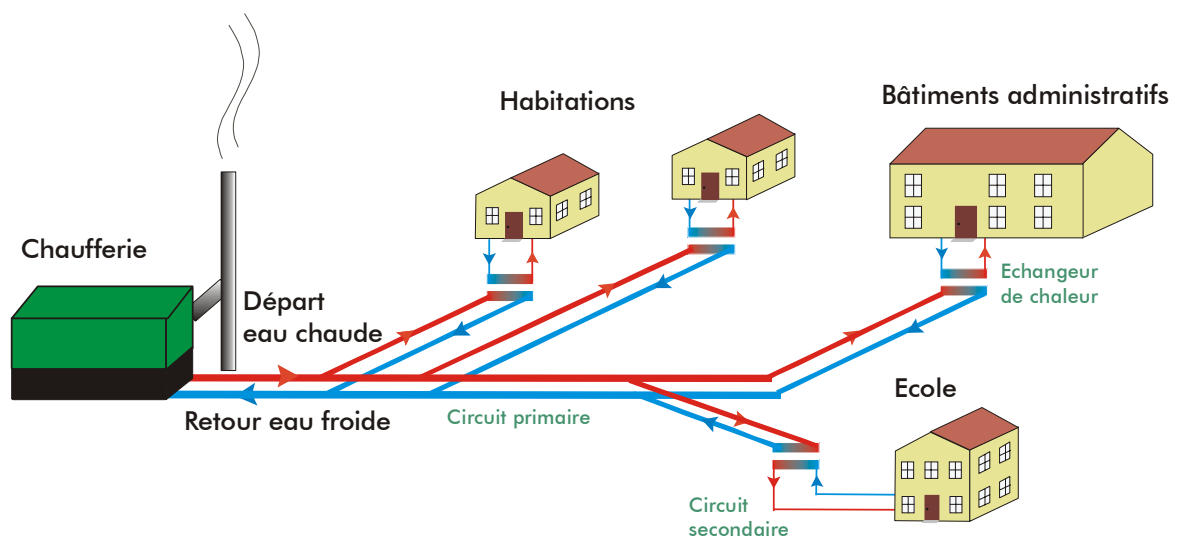


Figure 25 : exemple schématique de réseau de chaleur

8.4 La production d'électricité et la cogénération par combustion-vapeur

La vapeur sous pression produite par une chaudière au bois est capable de générer une force motrice. Le principe est exploité depuis des siècles : nous avons tous en tête les locomotives à vapeur. Couplée à un alternateur, cette force fournit une puissance électrique. A l'heure actuelle, deux technologies s'imposent pour transformer l'énergie que renferme la vapeur sous pression en force motrice : les turbines-vapeur et les moteurs à vapeur.

8.4.1 Les cycles turbine-vapeur

Les turbines-vapeur sont particulièrement adaptées à la génération d'électricité au dessus de 3 MW. Elles sont constituées d'aubages mobiles, solidaires d'un arbre central, et d'aubages fixes. La vapeur à haute pression (plusieurs dizaines de bar*) se détend sur les aubages mobiles, communiquant l'énergie mécanique à l'arbre et entraînant sa mise en mouvement. Au sein de l'alternateur, la rotation de l'arbre génère de l'électricité.

Il existe différents types de cycles turbines-vapeur dont l'utilisation dépend de la typologie des besoins énergétiques.

Les turbines à condensation

Les *turbines à condensation* exploitent pratiquement l'entièreté de l'énergie contenue dans la vapeur. A leur sortie, elles ne laissent qu'une vapeur à très basse pression, en mélange avec des gouttelettes d'eau et difficilement utilisable excepté pour le chauffage à basse température comme le préchauffage d'eau. Ces turbines sont donc adaptées à la seule génération d'électricité, ce qu'elles font avec un bon rendement.

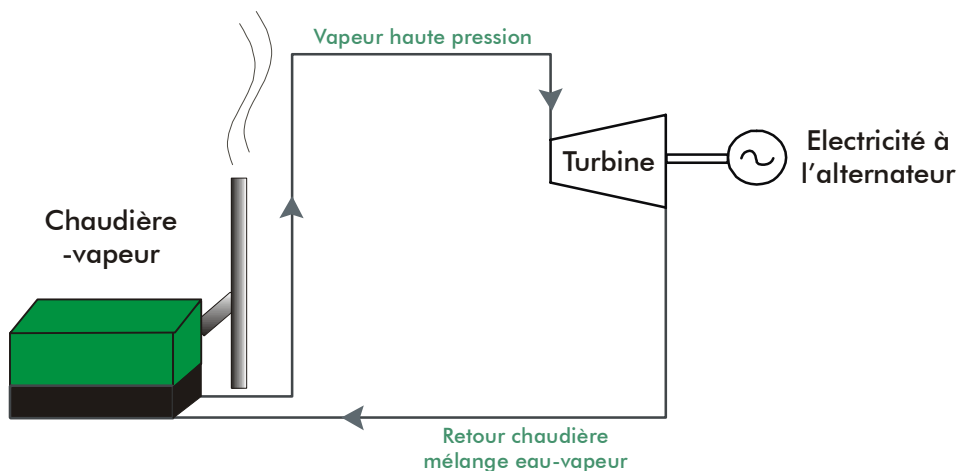


Figure 26 : Schéma général d'une installation de production d'électricité par combustion de bois avec une turbine à condensation

Les turbines à contre-pression

A la sortie des *turbines à contre-pression*, la vapeur est uniquement en phase gazeuse et à une pression qui permet d'encore satisfaire des besoins en chaleur (process industriel avec vapeur basse pression ou chauffage de bâtiments). Les rendements électriques de turbines à contre-pression sont plus faibles mais elles assurent également une exploitation de chaleur et elles demandent un investissement moins important.

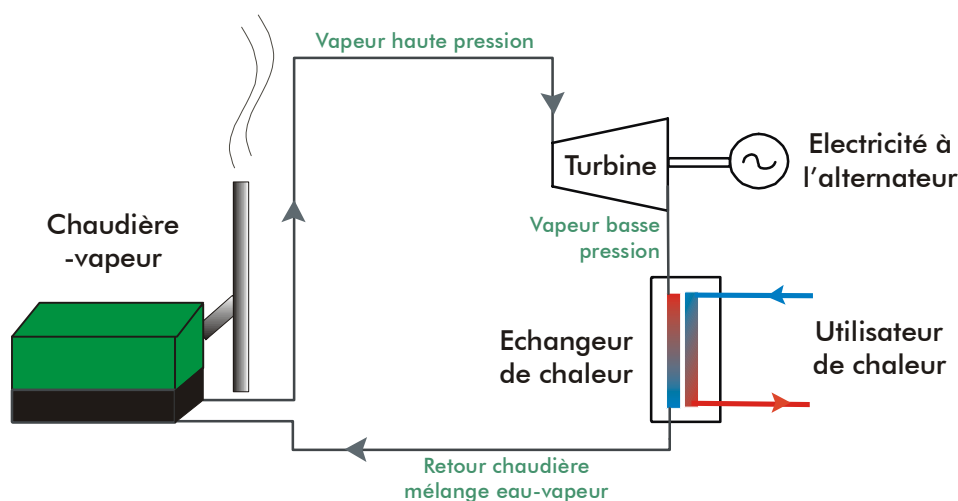


Figure 27 : Schéma général d'une installation de cogénération par combustion de bois avec une turbine à contre-pression

Les turbines à soutirage et la combinaison de plusieurs turbines

En fonction des caractéristiques des besoins en énergie, il peut être intéressant de combiner, au sein d'une même installation, une turbine à contre-pression à une turbine à condensation.

Au sein d'une turbine à condensation, il est également possible d'effectuer des soutirages de vapeur avant sa détente complète. De cette manière, seule une partie du flux de vapeur est entièrement utilisée pour produire de l'électricité jusqu'à condensation tandis qu'une autre partie est déviée en cours de détente, à une pression intermédiaire pour satisfaire des besoins en chaleur. Un ou plusieurs soutirages sont possibles.

Pour mémoire, retenons également les installations de cogénération par combustion du bois avec **cycle ORC**. Ces dispositifs combinent deux circuits de fluides : un fluide caloporteur qui est l'huile thermique et un fluide de travail, le silicone. Aucune centrale de ce type n'est installée en Belgique.

A l'heure actuelle, il n'existe en Wallonie aucune turbine-vapeur associée à une chaufferie au bois.

8.4.2 Moteurs à vapeur

Pour des puissances électrique de l'ordre de la centaine de kW, le moteur à vapeur connaît un regain d'intérêt. Il fonctionne selon le même principe que les anciennes locomotives où la force de la vapeur sous pression entraîne un ou des pistons en mouvement.

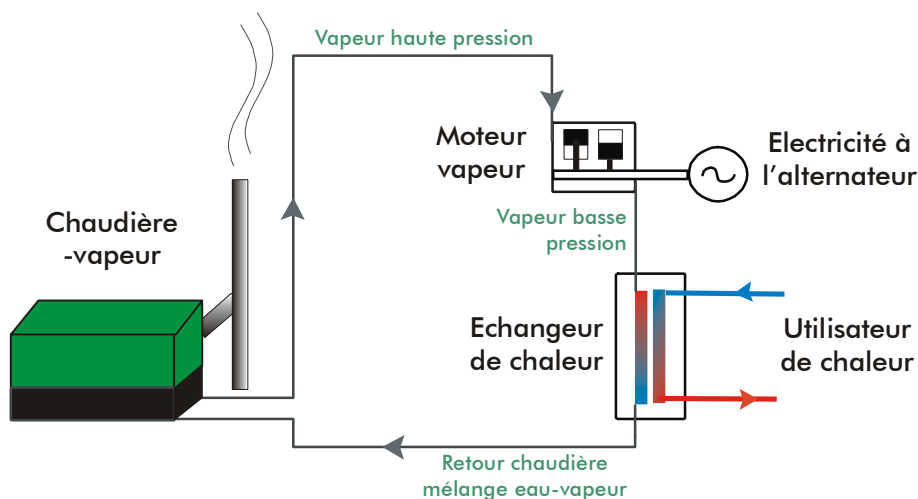


Figure 28 : Schéma général d'une installation de cogénération par combustion de bois avec un moteur à vapeur

Une installation de cogénération à moteur à vapeur suit le même schéma général que celle à turbine-vapeur. Ces installations connaissent encore des problèmes techniques freinant leur nouvelle percée sur le marché. D'autre part, il n'y a plus qu'un seul constructeur de telles machines en Europe.

Tableau 9 : Technologies actuelles de cogénération par combustion du bois (source : ADEME 2001)

	<i>Gamme de puissance</i>	<i>Rendement électrique</i>
Turbines-vapeur à contre-pression	à partir de 100 kW _{él}	10 à 15% en dessous de 5 MW _{él} 15 à 20% au dessus de 5 MW _{él}
Turbines-vapeur à condensation	à partir de 500 kW _{él}	15 à 20% en dessous de 2 MW _{él} 20 à 30% au dessus de 2 MW _{él}
Moteur à vapeur	de 120 à 1.500 kW _{él}	15 à 20%
ORC	300 à 1.000 kW _{él}	12 à 15 %

Tableau 10 : Avantages et inconvénients des technologies actuelles de cogénération par combustion du bois
(source : CRA-W et ADEME 2001)

	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Turbines-vapeur à contre-pression	<ul style="list-style-type: none"> ▪ technologie mature et prouvée ▪ technologie la moins chère à l'investissement ▪ relativement simple de conduite et d'entretien ▪ possibilité d'usage thermique en aval de la turbine ▪ large gamme de puissance 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ faible rendement électrique ▪ haute pression de vapeur d'admission pour améliorer le rendement électrique
Turbines-vapeur à condensation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ technologie mature et prouvée ▪ rendements électriques élevés ▪ large gamme de puissance 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ rendement électrique très tributaire de la charge en vapeur ▪ énergie thermique basse température à la sortie de la turbine ▪ investissement et exploitation onéreux ▪ difficilement envisageable en-dessous de 500 kW_{el}
Moteur à vapeur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ plus performant que les turbines en faibles puissance, et par rapport à la pression de vapeur (environ 30 bars) ▪ rendement partiellement indépendant du régime ▪ technologie modulaire et possibilité d'extraction de la vapeur 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ coûts d'investissement élevés ▪ coûts d'exploitation relativement élevés ▪ beaucoup de vibrations et de bruit ▪ traces d'huile dans la vapeur
ORC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ chaudière à huile thermique au lieu de vapeur à haute pression donc réduction des coûts d'investissement et de maintenance ▪ rendement électrique peu sensible à une réduction de régime 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ coût élevé ▪ peu de références (mais plusieurs installations récentes en Europe)

8.5 La co-combustion

Afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre générés par les centrales thermiques existantes, différentes technologies ont été développées pour utiliser, au sein d'une même installation, un combustible fossile – le plus souvent du charbon – et un combustible renouvelable tel le bois. Cette utilisation simultanée de combustibles dans un même foyer s'appelle la co-combustion.

Ainsi, dans certains pays européens, des centrales thermiques ont été transformées de manière à pouvoir y utiliser, à l'aide d'injecteurs spéciaux, du bois pulvérisé dans les foyers à charbon. La reconversion de ces centrales de grande puissance (plusieurs dizaines voire centaines de MW) permet aux compagnies d'électricité de bénéficier des incitants gouvernementaux pour la production d'électricité verte, et cela, pour de faibles investissements. En effet, le coût de la modification du foyer d'une centrale existante est relativement faible par rapport au montage d'une installation complète fonctionnant entièrement à la biomasse.

Notons également la possibilité d'utiliser le gaz pauvre de gazéification en lit fluidisé au sein d'une chaudière au charbon.

Même si le système des certificats verts ne reconnaît pas la co-combustion, des modifications de ce type sont à l'étude en Région wallonne, dans le cadre d'une politique d'abandon du charbon de certaines compagnies de production d'électricité.

9 Le bois-énergie en Wallonie

Si le bois est utilisé depuis toujours pour produire de l'énergie en Wallonie, les techniques modernes commencent à se développer depuis une dizaine d'années seulement.

9.1 Les industries de la transformation du bois

Les premières réalisations ont vu le jour dans le secteur de l'industrie du bois, où les entreprises ont rapidement fait un double constat :

- d'une part, une quantité importante de produits connexes à évacuer ;
- d'autre part, une facture énergétique de plus en plus importante.

La valorisation la plus courante et la plus ancienne est l'utilisation d'un poêle destiné à chauffer l'atelier. Cette façon de procéder est souvent complétée par le don ou la vente de chutes de bois aux ouvriers de l'entreprise ou à des particuliers.

Des systèmes plus performants – en matière de rendement et de qualité de la combustion – sont utilisés pour chauffer des locaux, alimenter des séchoirs à bois ou encore produire de l'électricité. Dans ces cas, les entreprises sont la plupart du temps autonomes au point de vue de l'approvisionnement en combustible.

Notons que des entreprises ne faisant pas partie de la filière bois commencent également à s'intéresser au bois-énergie.

Afin d'aider au développement de la filière bois-énergie dans le milieu industriel, la Région wallonne a mandaté ValBiom pour assurer le rôle de Facilitateur bois-énergie pour le secteur privé.

9.2 Le secteur public : le Plan Bois-Energie et Développement Rural

Initié en 2001, le Plan Bois-Energie et Développement Rural (PBE & DR) avait pour objectif principal d'initier une dizaine de projets-pilotes dans le domaine public wallon (bâtiments publics, avec ou sans réseau de chaleur). Il s'agissait également de valoriser écologiquement et économiquement une ressource locale (bois peu ou mal valorisés de forêts publiques), tout en participant localement au développement durable (production d'énergie verte, participation à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, ...) et au maintien d'une économie rurale viable.

Actuellement, plusieurs projets sont au stade d'une étude avancée. Les premières réalisations devraient voir le jour sous peu, si l'on excepte la commune de Chimay qui utilise le bois pour chauffer sa piscine depuis 1983 (la chaudière à bûches d'origine a été remplacée depuis peu par une chaudière bois à alimentation automatique).

La Fondation Rurale de Wallonie (FRW) a été désignée par la Région wallonne pour assurer le rôle de Facilitateur bois-énergie pour le secteur public.

Il est utile de signaler que le Gouvernement wallon a approuvé, lors de la séance du 27 mai 2004, un dispositif d'encadrement et de développement de la filière Bois-énergie et Développement rural en Wallonie. Les deux Faciltateurs bois-énergie illustrent la concrétisation de ce dispositif.

9.3 Les particuliers

La façon la plus traditionnelle d'utiliser le bois pour se chauffer reste l'utilisation d'un poêle, d'un feu ouvert ou d'une cassette, parfois d'une chaudière à bûches. D'après le dernier recensement de l'INS (2001), environ 26 000 ménages wallons utilisent le bois comme source principale pour le chauffage, ce qui représente une proportion de 2% par rapport au nombre total des ménages. La situation diffère sensiblement d'une province à l'autre, comme le montre le tableau suivant. Certaines communes forestières atteignent même une proportion de 20% !

Tableau 11 : Proportion de ménages utilisant le bois comme source principale pour le chauffage
(Source : INS, 2001)

	%
Brabant wallon	1,0
Hainaut	1,2
Liège	1,4
Luxembourg	7,8
Namur	3,1

Toujours d'après l'INS, environ 3 000 ménages disposeraient d'un système de chauffage central au bois.

On remarque une évolution en ce qui concerne le type d'appareil utilisé pour le chauffage. En effet, une nouvelle génération de poêles, plus performants (meilleurs rendements, moindres émissions), a vu le jour. De nouveaux combustibles, tels que les granulés de bois, sont apparus sur le marché accompagnés d'appareils spécifiques (poêles à granulés). Il en est de même au niveau des systèmes de chauffage central. Jusqu'ici, ces systèmes étaient exclusivement alimentés par des chaudières à bûches. L'apparition de systèmes à alimentation automatique (bois déchiqueté et granulés de bois) permet d'obtenir un confort d'utilisation assez semblable à celui assuré par des chaudières alimentées en combustibles fossiles. Les nombreuses demandes d'information attestent de l'intérêt croissant du public pour ces nouvelles techniques de chauffage au bois.

10 Pour en savoir plus

Atlas énergétique de la Wallonie.

Institut Wallon asbl (ICEDD) avec la collaboration de l'Agence Alter. **CD Rom**. DGTRE. 2^{ème} édition électronique, décembre 2002.

Bois-énergie. Chaufferies à alimentation automatique.

ADEME. 1999. Connaître pour agir. Guides et cahiers techniques. 155 p. Paris, France. ISBN 2-86817-284-9

Cogénération à partir de biomasse : la filière combustion/vapeur en petite puissance.

ADEME – Centre d'Angers, Biomasse Normandie et Heat Technics. Rapport final. Juin 2001. 119p.

Guide Biomasse-Energie.

BENABDALLAH B., CARRE J., KHENNAS S., VERGNET L.F. et OSSOOUKAI P. 1994. Collection Etudes et filières. 320 p. ISBN 2-87209-279-X

Dossier cogénération.

Bois Energie n°1/2003. pp.16-36. ITEBE

Guide Biomasse-Energie.

Seconde édition. 2005. A paraître.

Projet "Plan pour la Maîtrise durable de l'Energie". A l'horizon 2010 en Wallonie.

Cabinet de José Daras, Ministre des Transports, de la Mobilité et de l'Energie et Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie (MRW-DGTRE). 2002. 119p. + annexes.

Le chauffage au bois.

CARRE J., HEBERT J., LACROSSE L. et SCHENKEL Y. 1991. Note technique du Centre de Recherches agronomiques de l'Etat Gembloux. N° 48 juin 1991. 2^{nde} édition. 56p. ISSN 0771-0607.

La valorisation des produits connexes du bois.

CENTRE TECHNIQUE DU BOIS ET DE L'AMEUBLEMENT (CTBA). 1992. Avec le concours de l'ADEME et d'Electricité de France. 101 p.

Chauffage au bois. Solutions standards. Assurance Qualité.

GABATHULER H.R. & MAYER H. Suisse Energie – Office Fédéral de l'Energie. 2003.106 p.

La forêt wallonne – Etat de la ressource à la fin du 20^{ème} siècle.

LECOMTE H., FLORKIN P., MORIMONT J.P. et THIRION M. 2002. Division de la Nature et des Forêts (MRW-DGRNE). 69 p.

Le pouvoir calorifique du bois.

MARCHAL D. 2001 Sylva Belgica **108** (4), 44-45.

Inventaire des sources de biomasse ligneuse en Région wallonne.

MARCHAL D., GRULOIS C. et VANKERKOVE R. 2003. Equipe Régionale Biomasse Energie (ERBE). 63p.

Wood Burning Units.

MAXWELL et al. 1981. Creosote Report. Major Accomplishments. Sept. 1977. Auburn University.

Chauffage au bois. Planification et exécution. Assurance Qualité.

NUSSBAUMER T., GOOD J., JENNI A., BÜHLER R. & GABATHULER H.R. Suisse Energie– Office Fédéral de l'Energie. 2003.174 p.

Handbook of biomass combustion and cofiring.

VAN LOO S. et KOPPEJAN J. 2002. Prepared by Task 32 of the Implementing Agreement on Bioenergy under the auspices of the International Energy Agency. Edition Twente University Press. 348p. ISBN 9036517737.

Valorisation énergétique de la biomasse végétale. Aspects socio-économiques et environnementaux.

VAN THEMSCHE C. Ecole de Commerce de Solvay. ULB. 2004.126p. + annexes.

La combustion du bois.

WINKELMANN H. G. [en ligne]. Unasyva. Vol. 9. N°2. Disponible sur : <<http://www.fao.org/docrep/x5375f/x5375f05.htm>> (consulté le 08.04/03).

11 Glossaire

Bar : unité de pression habituellement utilisée pour mesurer les pressions de vapeur.

Biomasse : ensemble des matières organiques d'origine animale ou végétale

Chaleur utile : il s'agit de chaleur utilisable. La notion de chaleur utile s'oppose à la chaleur totale produite dont une partie se dissipe dans l'atmosphère.

Cogénération : production simultanée de chaleur et d'électricité au sein d'une même installation.

Combustibles fossiles : il s'agit principalement du charbon, du pétrole et du gaz naturel. Ils portent ce nom car ils se sont formés pendant des millions d'années. Ils proviennent de la décomposition incomplète de la végétation qui couvrait alors la surface de la terre ou des organismes marins dans le fond des océans.

Densité énergétique : contenu énergétique par unité de volume (J/m³).

Dosses et délignures : chutes de bois lors d'opération de transformation. Les dosses sont les parties extérieures d'une bille enlevée à la scie, avec une partie plane et une partie courbe. Les délignures résultent, elles, de l'usinage de bois rond (délignage).

Ecorcer : ôter l'écorce.

Electricité verte : électricité produite à partir de sources renouvelables d'énergie ou de cogénération de qualité (en Wallonie).

Grume : arbre abattu

Houppier : ensemble des branches qui constituent la couronne d'un arbre. Plus fréquemment exploité chez les feuillus, pour lesquels les branches représentent un volume parfois important.

map : mètre cube apparent de plaquette, empilement d'un m³ de plaquettes

Pouvoir calorifique inférieur (PCI) : quantité théorique d'énergie contenue dans un combustible. Il ne tient pas compte de l'énergie contenue dans la vapeur d'eau présente dans les fumées.

Puissance nominale : puissance pour laquelle l'installation à été conçue et dimensionnée.

Pyrolyse : décomposition par action de la chaleur.

Stère : empilement d'un m³ de bûches

Taillis : forêt ou peuplement forestier constitué de tiges provenant du développement de rejets de souches et/ou de drageons.

Unités et symboles

	Unités	
Masse	kg	kilogramme
Energie	J	Joule
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)		
pour un combustible solide :	MJ/kg	MégaJoule par kilogramme
pour un gaz :	MJ/m ³ _N	MégaJoule par mètre cube de gaz dans des conditions normales de température et de pression
Humidité relative (HR)	%	pourcent
Masse volumique	kg/m ³	kilogramme par mètre cube
Volume (réel)	m ³	mètre cube
Volume d'un empilement de bûches	-	stère
Coefficient d'empilage (CE)	-	-
Facteur d'empilage (f)	-	-
Volume d'un empilement de plaquettes	map	mètre cube apparent de plaquettes
Rendement	%	pourcent
Puissance	W	Watt
puissance électrique :	W _{él}	Watt "électrique"
puissance thermique :	W _{th}	Watt "thermique"
k- = kilo- = x 1.000 (1 kW = 1 kiloWatt = 1.000 Watt)		
M- = Méga- = x 1.000.000		

Coefficients de conversion

	tep	MWh	GJ
tep	1	11,63	41,868
MWh	0,08598	1	3,6
GJ	0,02388	0,2778	1

12 Adresses utiles

▪ Guichets de l'Energie

Les 12 Guichets de l'énergie de la Région wallonne sont à votre disposition pour toute question : numéro général : 078 / 15 15 40

Guichet Energie Arlon

Adresse Rue de la Porte Neuve, 19
6700 Arlon
Tel. 063 / 24 51 00
Fax 063 / 24 51 09
guichet.arlon@mrw.wallonie.be

Guichet Energie Braine-le-Comte

Adresse Rue Mayeur Etienne, 4
7090 Braine-le-Comte
Tel. 067 / 56 12 21
Fax 067 / 55 66 74
guichet.brainelecomte@mrw.wallonie.be

Guichet Energie Charleroi

Adresse Boulevard Gén. Michel, 1e
6000 Charleroi
Tel. 071 / 33 17 95
Fax 071 / 30 93 10
guichet.charleroi@mrw.wallonie.be

Guichet Energie Eupen

Adresse Rathausplatz, 2
4700 Eupen
Tel. 087 / 55 22 44
Fax 087 / 55 22 44
guichet.eupen@mrw.wallonie.be

Guichet Energie Huy

Adresse Place Saint-Séverin, 6
4500 Huy
Tel. 085 / 21 48 68
Fax 085 / 21 48 68
guichet.huy@mrw.wallonie.be

Guichet Energie Liège

Adresse Rue des Croisiers, 19
4000 Liège
Tel. 04 / 223 45 58
Fax 04 / 222 31 19
guichet.liege@mrw.wallonie.be

Guichet Energie Marche-en-Famenne

Adresse Rue des tanneurs, 11
6900 Marche
Tel. 084 / 31 43 48
Fax 084 / 31 43 48
guichet.marche@mrw.wallonie.be

Guichet Energie Mons

Adresse Avenue Jean d'Avesnes, 10-2
7000 Mons
Tel. 065 / 35 54 31
Fax 065 / 34 01 05
guichet.mons@mrw.wallonie.be

Guichet Energie Mouscron

Adresse Place Kasier, 13
7700 Mouscron
Tel. 056 / 33 49 11
Fax 056 / 84 37 41
guichet.mouscron@mrw.wallonie.be

Guichet Energie Namur

Adresse Rue Rogier, 89
5000 Namur
Tel. 081 / 26 04 74
Fax 081 / 26 04 79
guichet.namur@mrw.wallonie.be

Guichet Energie Ottignies

Adresse Avenue Reine Astrid, 15
1340 Ottignies
Tel. 010 / 40 13 00
Fax 010 / 41 17 47
guichet.ottignies@mrw.wallonie.be

Guichet Energie Tournai

Adresse Rue de Wallonie, 19-21
7500 Tournai
Tel. 069 / 85 85 36
Fax 069 / 84 61 14
guichet.tournai@mrw.wallonie.be

- **Ministère de la Région wallonne**
Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie
Division de l'Energie

Avenue Prince de Liège, 7
5100 Jambes
Tel : 081 / 33 55 06
Fax : 081 / 30 66 00
<http://energie.wallonie.be>

- **ValBiom asbl. Valorisation de la biomasse**

Mission de Facilitateur Bois-énergie de la Région wallonne – secteur privé

Adresse : Chaussée de Namur, 146
 5030 Gembloux

Personne de contact :

Didier Marchal

Tel : 081 / 62 71 44

Fax : 081 / 61 58 47

marchal@valbiom.be

<http://www.valbiom.be>

- **Fondation Rurale de Wallonie**

Mission de Facilitateur Bois-énergie de la Région wallonne – secteur public

Adresse : Rue du Carmel, 1
 6900 Marloie

Personne de contact :

Francis Flahaux

Tel : 084 / 22 03 65

Fax : 084 / 22 02 12

pbe@frw.be

<http://www.frw.be>

- **APERe asbl. Association pour la Promotion des Energies Renouvelables**

Adresse : Rue de la Révolution, 7
 1000 Bruxelles

Tel : 02 / 218 78 99

Fax : 02 / 219 21 51

info@apere.org

www.apere.org

- **Une liste des bureaux d'études compétents en matière de bois-énergie peut être obtenue auprès des Facilitateurs**