

LE BOIS-ÉNERGIE

AVANT-PROPOS

Le bois-énergie est un terme qui désigne à la fois le combustible bois et la filière énergétique utilisatrice des ressources végétales ligneuses. Le bois, comme toute biomasse végétale, est issu du processus de la photosynthèse, c'est à dire la production d'hydrates de carbone à partir de l'énergie solaire. C'est la troisième source d'énergie utilisée au monde après le pétrole et le charbon.

Il est complètement admis que son exploitation raisonnée contribue au maintien des équilibres biochimiques de la planète (neutralité du carbone renouvelable vis-à-vis de l'effet de serre, très faible teneur en soufre...). Depuis quelques dizaines d'an-

nées, l'intérêt porté au bois-énergie a fait apparaître de nouvelles filières, intégrant l'automatisation du chargement du combustible et de la gestion de la combustion. Ces nouvelles technologies se caractérisent par des performances énergétiques et environnementales très satisfaisantes. Ses ressources sont très importantes et proviennent :

- de la forêt (bûches, rémanents forestiers, petits bois d'élagage...)
- de l'agriculture (produits d'élagage du bocage, taillis à courtes rotations, tailles d'arbres fruitiers...)
- des activités humaines (bois de récupération...)
- des industries du bois (plaquettes, sciures, copeaux, granulés, briquettes...)



CHAINES DE PRODUCTION DU BOIS ÉNERGIE

Les bois utilisés pour l'énergie

Les travaux sylvicoles, c'est à dire les élagages et les éclaircies réalisés pour la production de bois d'œuvre de qualité, sont comme l'exploitation forestière fortement producteurs de sous-produits : branches, perches de dépressage ou de première éclaircie ou encore cimes et branches de seconde éclaircie. Une partie très majoritaire de ces produits, généralement petits, ne trouve aucun débouché : on estime à au moins deux millions, le nombre de m³ de ces produits qui pourraient être sortis économiquement de la forêt française chaque année si l'usage des chaudières automatiques à bois continuait à progresser. Ce sont autant de travaux qui seraient ainsi encouragés, au plus grand bénéfice des propriétaires.

Les résidus de l'exploitation du bois d'œuvre

La coupe des arbres pour l'alimentation des scieries génère des volumes de sous-produits importants et susceptibles d'être valorisés en énergie. Pour chaque arbre coupé, c'est entre 15 et 35% de son volume qui est constitué de branches non adaptées au sciage. Bien entendu, une partie de ces branches est récupérée pour alimenter les particuliers en bois de chauffage ou encore les papeteries et usines de panneaux agglomérés en matière premières : mais cette ressource est loin d'être utilisée en totalité.

Par ailleurs, de nombreuses essences ne conviennent pas au chauffage en bûche ou aux tritrateurs, et les petits diamètres (moins de 10 cm) sont très souvent délaissés ; pour la plaquette l'essence importe peu. Le fait d'abandonner ces produits a de nombreux inconvénients :

- cela favorise les feux de forêt et l'apparition des parasites
- cela encombre les surfaces et gêne les travaux sylvicoles ultérieurs
- cela donne à la forêt une image de non-entretien néfaste au tourisme
- cela gaspille une ressource que l'on sait maintenant très bien valoriser
- et surtout cela constitue un manque à gagner important pour les travailleurs de la forêt qui passent une partie de leur temps de travail à découper ou à brûler ces bois à abandonner, en pure perte.

Les houppiers et branchages

Le houppier est défini comme étant la partie aérienne d'un arbre au dessus de la première couronne (branches, rameaux, feuilles...). Il s'agit des ramifications de l'arbre et de la partie du tronc qui n'est pas comprise dans le fût.

Dans le langage courant, on parle de cime pour les résineux et

on garde le terme de houppier pour les feuillus.

Ces produits sont généralement très ramifiés. Leur mobilisation reste longue et coûteuse par rapport à la valeur marchande et à la quantité mobilisable.

La principale utilisation des houppiers et branchages est le bois de feu lorsqu'ils ont pu être plus ou moins façonnés. Dans le cas contraire (la plupart des cas), ils sont regroupés puis brûlés ou abandonnés sur place.

Les quantités de houppiers, branchages et feuillage disponibles sont immenses et les techniques de récolte des arbres entiers ouvrent la porte à leur valorisation.

Les résidus de l'entretien des haies et des espaces boisés non forestiers

L'aménagement des espaces verts des collectivités mais surtout l'entretien des haies par les agriculteurs ou les services des routes génèrent de grandes quantités de sous-produits disponibles pour la production de plaquettes forestières. Ce sont des coupes d'entretien d'arbres d'alignement, de parcs et jardins, de haies, de pâturages, de bords de route. Actuellement ces produits sont souvent soit incinérés soit broyés et laissés sur place. Des études fines commencent à en préciser les quantités exactes.

L'exploitation des haies conduit généralement à la récolte de différents types de produits dont la quantité mobilisable pour le bois énergie varie énormément : une moyenne de 30 à 100 tonnes par km de haie semble une bonne base pour le bois énergie.

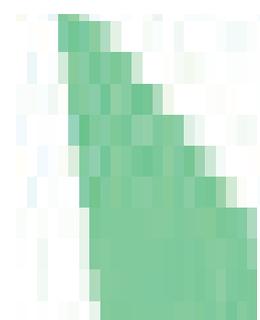


Photo 4 : Déchiquetage de petits bois

Les coupes d'éclaircies

Ce sont des produits de coupes périodiques (3 ou 4 coupes par génération d'arbres) visant à favoriser les arbres d'avenir par l'exploitation des sujets gênants ou en surnombre.



La quantité mobilisable en complément des billons (au delà de 8 cm) est considérable pour les premières éclaircies qui fournissent essentiellement de petits bois généralement destinés au bois de feu. Les éclaircies suivantes produisent des grumes mais aussi génèrent toutefois des rémanents (houppiers, branchages...) mobilisables pour le bois-énergie. Cependant, comme dans le cas des taillis, le bois énergie peut se révéler intéressant pour des éclaircies considérées comme médiocre pour la récolte en billons (bois trop petits). Des quantités de 50 à 100 t/ha peuvent alors être mobilisées.

Les coupes de taillis

Les taillis sont des peuplements obtenus à partir de coupes faites à des périodes brèves (3 à 25 ans). Ils ont été, pendant très longtemps, le mode traditionnel d'exploitation du bois de feu. Les taillis à courte rotation sont des cultures intensives d'arbres plantés à très forte densité et exploités selon un cycle court et qui rejettent de souche. Les taillis sous futaie sont des peuplements mixtes constitués par un taillis surmonté d'une futaie d'âge multiple.

Les taillis constituent une ressource bien adaptée au bois énergie d'autant plus que les tiges non marchandes nécessitent de toute façon un travail d'abattage et de démembrement qui est perdu dans les modes d'exploitation traditionnels en billons.

Un autre type de taillis, le TtCR (le Taillis très Courte Rotation), est développé dans d'autres pays comme la Suède. Cette culture entre plus dans le concept de l'agriculture que dans celui de la sylviculture. Dans la plupart des cas l'espèce qui convient le mieux est le saule. La plantation s'effectue au printemps à partir de boutures. Des machines horticoles peuvent convenir pour cette plantation. La fertilisation est réduite au minimum. Le rendement varie de 6 à 12 tonnes de matière sèche par hectare et par an selon le climat, l'âge de la plantation et l'itinéraire culturel. La récolte peut s'effectuer tous les 3 ans. Elle peut se faire de deux façons. La première est de récolter les tiges entières qui sont broyées après avoir été stockées pour profiter d'un séchage naturel. La seconde plus avantageuse au niveau économique, est la coupe avec broyage direct, effectuée grâce à des machines adaptables sur tracteur ou par une ensileuse à maïs équipée d'une tête de coupe spécifique.



Photo 5 : Récolte de TtCR

Les peuplements dédiés à la plaquette

Nombre de taillis, de plantations et de peuplements divers sont inadaptés à la production de bois d'œuvre ou même à la trituration, soit pour des questions d'essences soit pour des questions de coût de mobilisation. De nombreuses plantations n'ont pas reçu à temps les travaux pouvant leur garantir un avenir intéressant en sciage et se trouvent dépréciés. Pour revaloriser ou recycler ces surfaces, encore une fois, la plaquette combustible offre un débouché peut contraignant en qualité.

En faisant le total des chiffres que nous venons de passer en revue, il est aisé de constater que la ressource est variée, abondante et que le problème n'est pas là : plus de 25 millions de m³ de bois poussent chaque année en France, ne sont pas utilisés et ne trouvent par conséquent aucune rémunération. Cela laisse de la place au développement du bois-énergie sans gêner les autres utilisations du bois !

Une partie de cette ressource peut être valorisée en combustible plaquettes par déchiquetage si elle ne trouve pas d'autres débouchés plus rémunérateurs. Une petite partie des houppiers et branchages est façonnée en vue d'une commercialisation ultérieure en bois de chauffage sous forme de bûche. Le bois d'éclaircie est le résultat de la conduite des forêts en futaie de bois d'œuvre de qualité. Ces bois d'éclaircie sont généralement trop petits pour trouver d'autres débouchés que la trituration et le chauffage.

Tableau 7 : Quantités de bois récoltable par type de travaux [source ADEME AFOCEL]

Type de coupe	Déchiquetage	Bois récoltable en tonnes fraîches par ha
Coupe rase ou gros bois feuillus	Branches non marchandes	25 à 50 t
	Tout le houppier	50 à 100 t
Coupe rase de taillis ou taillis sous futaie	Brins non marchands + cimes	50 à 150 t
	Tout	200 à 400 t
Eclaircies de résineux	Brins non marchands + cimes	15 à 50 t
	Tout	75 à 150 t



La production de combustibles bois

L'abattage et le façonnage

L'abattage et le façonnage sont les premières opérations de l'exploitation forestière. Elles consistent à couper l'arbre au pied et à le débiter en différents produits : billons ou perches façonnées, branchages, cimes ou houppiers. Ces opérations se font conjointement essentiellement de novembre à mars en période de «sève descendante» pour un séchage plus rapide du bois grâce au retrait naturel de la sève. Pour de gros chantiers avec des produits de grosses dimensions, l'abattage et façonnage peut être mécanisés sur des terrains porteurs, avec un relief qui n'est pas trop accidenté. Quand les conditions d'une mécanisation peuvent être réunies - terrain assez plat, arbres rectilignes et coupes importantes - celle-ci réduit sensiblement les coûts de l'abattage. On peut ainsi distinguer trois cas :

• Méthode manuelle

C'est la méthode la plus employée. L'abattage et le façonnage se font à l'aide d'une tronçonneuse. Cette méthode est particulièrement bien adaptée pour la récolte de gros diamètres, de bois irréguliers, ou lorsque le terrain interdit les engins.



Photo 6 : Abattage d'un chêne

• Méthode semi-mécanisée

L'abattage est fait à la tronçonneuse, le débardage par treuil et le façonnage par un processeur. Cette méthode est adaptée aux chantiers de petits bois réguliers.

• Méthode mécanisée

Elle s'effectue sur un terrain de faible pente moyennant une

abatteuse qui permet d'abattre les arbres sur pied et de les façonner entièrement en longueur de 2 ou 4 mètres. Elle peut être envisagée pour des petits bois lorsque les quantités à récolter sont plutôt grandes. Elle permet d'avoir des rendements de 50 à 100 m³/jour quand tout va bien.



Photo 7 : Abatteuse Tigercat à chenille

Le débardage

Le débardage consiste à transférer les produits façonnés jusqu'en bord de route par des techniques de treuillage ou de portage. Il peut aussi être réalisé par cheval sur des terrains d'accès difficile, pour des distances de débardage qui n'excèdent pas 100 m et pour des produits de petites dimensions (premières éclaircies de petits bois, jeunes taillis). Plus les bois sont débardés grands, moins les coûts sont importants.

Le débardage mécanisé peut être effectué par plusieurs machines:

- Un tracteur agricole muni d'un treuil
- Un tracteur muni d'une grue à grappin et une remorque forestière
- Un tracteur muni d'une pince de débardage,
- Un tracteur muni d'un chargeur à ballots à de rondins.
- Un porteur équipé d'une grue à grappin: engin articulé à 4, 6 ou 8 roues motrices avec une charge utile allant de 8 à 15 tonnes et un rendement de 50 à 100 m³/heure selon les modèles choisis, voire plus si le débardage est en ballots. Ce type de machine est préconisé pour les bois de 2, 4 ou 6 m.
- Un débusqueur: engin articulé à 4 roues motrices, équipé d'un ou de deux treuils. Normalement adapté au débardage des grosses grumes, il peut permettre le débardage raide de paquets de perches ébranchées.

D'autres moyens de débardage non-mécanisé sont utilisés pour les terrains en pentes :

- Le câble de débardage pendu entre deux arbres permet de faire glisser les rondins jusqu'en bas de la pente sans provoquer de dégâts à la forêt.
- Les goussières de débardage permettent de faire glisser des rondins de diamètres inférieurs à 35 cm en bas de pentes.





Photo 8 : Treuil de débardage monté sur tracteur agricole



Photo 9 : Débardage par treuillage au débuseur



Photo 10 : Débardage par porteur forestier

Production de plaquettes forestières

Les petites déchiqueteuses portées

Ces machines de petite taille et montées sur le trois points des tracteurs agricoles, sont les plus répandues. Elles conviennent aux travaux manuels ou à la grue principalement pour le déchiquetage agricole, paysager ou pour l'autoconsommation par les propriétaires forestiers, agriculteurs ou communes.

Le déchiquetage se fait à poste fixe devant un tas, le long des routes ou des haies voire en allure rampante dans les cloisonnements forestiers ou sur des coupes définitives. La déchiqueteuse peut éjecter la plaquette dans une remorque agricole classique ou élévatrice, voire directement dans le stockage. L'éjection pourra même se faire dans le silo d'alimentation de la chaudière si les branches ont préalablement été laissées à sécher durant les mois d'été puis transportées sur place. Les diamètres acceptés par ces machines n'excèdent pas 30 cm, ce qui veut dire en pratique que ces machines sont adaptées pour des bois de 3 à 20 cm de diamètre à hauteur d'homme. La productivité varie entre 1 à 3 MAP/h en alimentation manuelle et 3 à 10 MAP/h à la grue. (MAP : mètre cube apparent de plaquettes).



Photo 11 : Petite déchiqueteuse portée

Les déchiqueteuses tractées

Les déchiqueteuses tractées sont des machines destinées à des activités plus professionnelles que les précédentes. Elles sont de deux types : certaines sont actionnées par leur propre moteur et d'autres par la prise de force d'un tracteur.



Ces machines nécessitent des puissances de 70 à 160 CV et sont conçues pour déchiqeter des bois de 10 à 35 cm de diamètre. L'utilisation de ces machines s'avère intéressante sur des terrains accessibles car elle évolue difficilement en forêt. Leur transport est très aisé. L'alimentation peut se faire à la main comme à la grue et les rendements peuvent aller de 3 à 20 MAP/h, voire beaucoup plus pour des modèles de fortes capacités.



Photo 12 : Déchiqeteuse tractée

Les déchiqeteuses automotrices

Les déchiqeteuses automotrices sont des engins tous terrains à 4, 6 ou 8 roues, généralement montées sur une base de porteur forestier et conçus pour évoluer en forêt. Elles sont équipées d'un grappin preneur et d'un conteneur de 15 m³ environ. Equipées d'une déchiqeteuse de capacité moyenne (30 cm de diamètre en général), elles sont adaptées pour ramasser branches et perches abattues et laissées au sol ou en andains.

Ce sont des machines destinées à des professionnels devant réaliser des productions annuelles de l'ordre de 30 000 MAP/an et par machine. Leur productivité moyenne est de 20 MAP/h car elles ont à réaliser également le débardage. Sur les grands chantiers, ce rendement peut être amélioré par la mise en place d'un second attelage de débardage équipé d'une remorque élévatrice pour le bennage dans les conteneurs routiers. Les automotrices peuvent intervenir sur coupe définitive ou en cloisonnements, toutefois, leur masse et leur volume interdisent leur utilisation sur un terrain peu portant ou en forte pente.



Photo 13 : Déchiqeteuse automotrice

Les grandes déchiqeteuses stationnaires

Ce sont les plus gros modèles de déchiqeteuses mobiles et elles sont adaptées au travail à poste fixe sur place de dépôt ou bord de route pour le déchiqetage de grandes quantités (500 à 1000 m³ par place). Montées sur des camions ou semi-remorques, elles sont équipées d'un moteur autonome de 350 à 600 CV, ce qui leur permet de passer des bois jusqu'à 40-60 cm de diamètre voire plus. Leur productivité varie de 40 à 100 MAP/heure. Au vu de ces débits, une logistique bien huilée doit permettre aux camions de se succéder à côté de la machine pour évacuer les plaquettes sans faire perdre de temps ni à la machine ni aux camions.



Photo 14 : Déchiqeteuse automotrice

Les déchiqeteuses fixes pour perches ou ballots

Quand les chaufferies à alimenter sont très importantes, il est envisageable de les équiper d'une plate forme de broyage dédiée pour une partie de leur approvisionnement. Cela permet à la chaufferie d'acheter des bois classiques non déchiqetés quand cela les arrange : des grumes déclassées, des rondins ou de la dosse.

Ces machines, généralement de fortes capacités, acceptent également les fagots de branches : cette technique a été mise au point pour la récolte des petites branches et cimes à destination de l'énergie et vient compléter deux autres logistiques déjà en place :

- les automotrices qui produisent les plaquettes sur la coupe : cette logistique n'est pas tout le temps possible en flux tendu car en saison de chauffe il peut y avoir de la neige sur les coupes, les sols peuvent être impraticables et les bois trop détremés.
- le débardage des produits en bord de chemin en vrac pour un ressuyage et un déchiqetage durant la saison de chauffe par des machines stationnaires : pour les mêmes raisons cette logistique peut être contrariée par le climat.

La mise en ballot permet de transformer des résidus forestiers non transportables en l'état, en fagots manipulables selon des logistiques classiques, en particulier les grumiers à plateau, pour ensuite les stocker et les déchiqeter a posteriori sur les lieux de consommation au moment opportun et à des coûts intéressants.





Photo 15 : Fagotteuse



Photo 17 : Fendeuse horizontale (Kretzer)



Photo 16 : Tas de fagots



Photo 18 : Fendeuse verticale avec treuil de levage (Rabaud)

Production de bois de chauffage

Le fendage

Le fendage est l'opération qui consiste à fendre les rondins en 2 à 16 éclats. Il a pour but de réduire le diamètre des bouts, de faciliter leur séchage et de faciliter leur inflammation dans les foyers. La mécanisation permet de réduire la pénibilité et les risques du fendage, ainsi que les coûts de production. Il existe plusieurs types de fendeuses.

- **Les fendeuses hydrauliques verticales ou horizontales**

Les fendeuses hydrauliques sont composées d'un tablier où repose le rondin et d'un vérin sur lequel est disposé un couteau ou un coin. Sous l'action du vérin, le coin ou le couteau pénètre et fend la bûche. Ces fendeuses sont entraînées par la prise de force d'un tracteur ou par un moteur autonome (essence ou électrique). Elles disposent d'une force comprise entre 5 et 30 tonnes et acceptent des bois d'une longueur d'environ 1 mètre. Ces appareils permettent d'avoir des rendements de 2 à 3 stères par heure.

- **Les fendeuses à vis**

Ces types de fendeuse qui font éclater la bûche grâce à la pénétration d'une vis, sont entraînées par la prise de force d'un tracteur. Elles ont été créées pour un usage artisanal.

DANGER : ces machines sont dangereuses et nous ne pouvons que déconseiller leur usage. Il est en effet très facile de se faire happer par les vêtements et de périr atrocement.



Photo 19 : Fendeuse horizontale avec grue (POSCH)



• Les grappins fendeurs

Le grappin-fendeur facilite le travail de l'exploitant en diminuant les manutentions. Il permet en effet de fendre, d'empiler et de dépiler le bois. Il peut fendre en 4, 6 ou 8 morceaux. Il s'adapte sur des pelles ou grues équipées d'un grappin forestier. Il est utilisé principalement pour fendre les gros morceaux et il accompagne d'autres fendeuses dans l'exploitation.

• Les combinés scie-fendeuse

De plus en plus de constructeurs proposent des machines de production de bois de chauffage qui coupent et fendent. Ces machines permettent de rationaliser la production des bûches en évitant des manutentions intermédiaires. Elles peuvent couper et fendre des bois jusqu'à 30-40 cm de diamètre.

Les bois de grandes tailles peuvent être amenés, coupés, fendus grâce à ces plate-formes plus ou moins mécanisées (tapis, chaîne, grappin...). Ces machines permettent des rendements allant entre 5 et 15 stères par heure selon le modèle.

Les critères de choix pour un combiné scie-fendeuse dépendent du type de bois à couper et à fendre (diamètre et longueur), de la productivité et de la capacité souhaitée, usage mobile ou fixe, du nombre de personnes présentes pour l'opération, de l'équipements déjà disponible sur le site et surtout des capacités d'investissement.



Photo 20 : Scie-fendeur horizontale (Japa)



Photo 21 : Scie-fendeur (Binderberger)



Photo 22 : Scie-fendeur (BGU Maschinen)



Photo 23 : Scie-fendeur (Palax)

• Scie- fendeuses sur plate-formes

Le fendage et la découpe en bûches peuvent se faire sur une plate-forme de production de bois de chauffage. Le fendage sur site fixe permet de transférer les opérations depuis la forêt et de libérer la parcelle. Ce type d'exploitation permet surtout de mieux organiser la transformation en bûche calibrée et d'optimiser la productivité en conditionnant plus de volume. La productivité peut atteindre 90 à 120 stères/jour.

La plate-forme de production de bois de chauffage comporte généralement :

- Un espace de réception et de stockage de la matière première livrée par grumier en 1 m, 2 m, 4 m ou plus.
- Un emplacement pour le matériel de conditionnement, où les perches ou grumes sont automatiquement débitées par une scie à chaîne à la longueur voulue, puis fendues en 2, 4, 6 ou plus en fonction du diamètre de la perche et du type de fendeuse.
- Un espace pour le stockage et séchage.

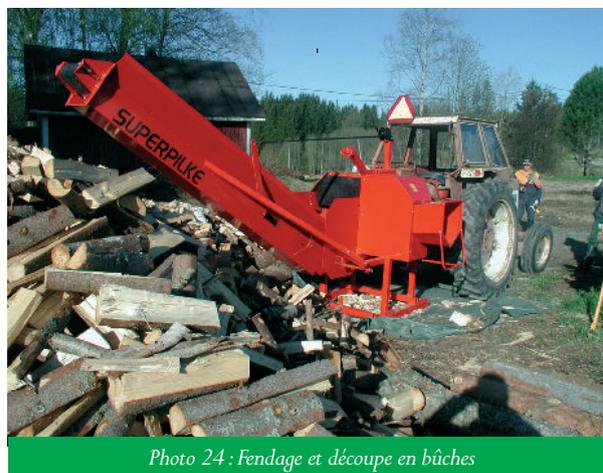


Photo 24 : Fendage et découpe en bûches



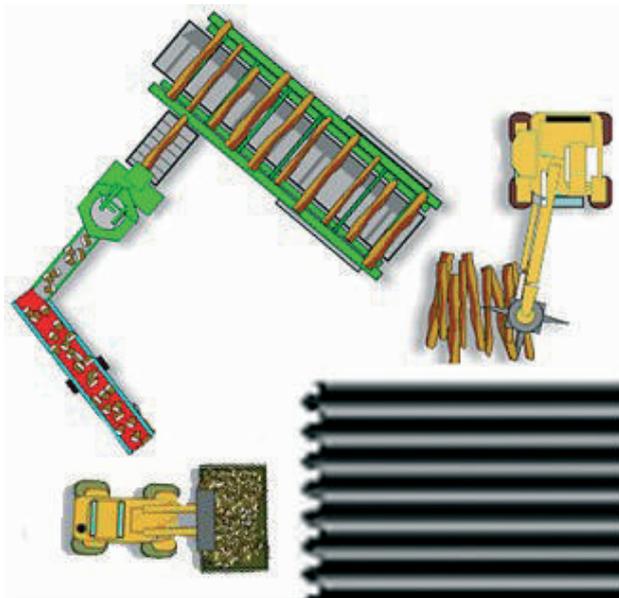


Schéma 1 : Scie-fendeuse sur plate-forme



Photo 25 : Petite fendeuse électrique (Kretzer)



Photo 26 : Plate-forme mobile (Pinosa)

Le sciage

Quand il n'est pas réalisé simultanément avec le fendage, le sciage est réalisé sur des bois fendus en 1 mètre. Plusieurs organisations sont possibles.

• Sur place de dépôt, sur plate-forme ou chez le client

Une possibilité est d'avoir toujours du bois en 1 m et de le scier en sec directement chez le client. Cette méthode pose trois inconvénients. Le premier est que le bois est séché en 1m, ce qui prend plus de temps que si le bois est stocké en courtes longueurs. De même il y'a beaucoup plus de dépenses d'énergie si on scie du bois sec, qui est plus résistant à la coupe. Enfin, la scie est transportée chez le client, ce qui prend beaucoup de temps. Par contre, le sciage peut être réalisé dans un site ou plate-forme. Cela permet de scier le bois vert, tout de suite après le fendage et de stocker sous hangar dans la plate-forme.

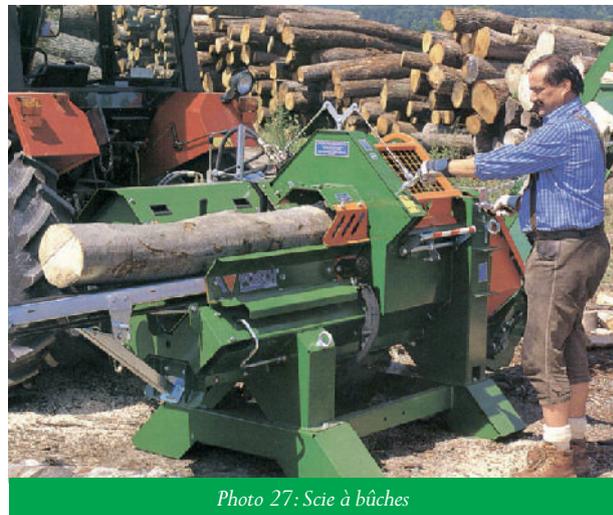


Photo 27 : Scie à bûches

• En fagots ou en vrac

Si les bûches en 1m n'ont pas été fagotées, elles seront sciées individuellement à l'aide d'une scie à bûches. L'enstérage des bûches permet de scier en courtes longueurs le fagot entier à la tronçonneuse. Il existe aussi des machines qui scient les stères automatiquement avec une grande scie. L'enstérage des bûches permet une fois de plus de gagner du temps.



Photo 28 : Recoupe d'un fagot sur palette (Woodmax)





Photo 29 : Découpeuse de fagots (Arci) en 50 cm



Photo 30 : Enstèrage de bûches

Le processus de granulation

Les granulés de biomasse combustible sont le plus souvent fabriqués à partir de sous-produits de l'industrie du bois tels que les copeaux ou la sciure de bois. Actuellement la possibilité de produire des granulés combustibles à partir de résidus agricoles (pailles, plantes dédiées, céréales...) est étudiée mais encore peu pratiquée car leur combustion pose encore quelques problèmes techniques.

Les étapes de la production sont les suivantes :

• Sélection :

Les sciures sont d'abord acheminées jusqu'à un tamis grossier où les corps étrangers et les éléments de taille trop importante sont évincés. Les refus de bois serviront à alimenter la chaudière à bois déchiqueté de grande puissance.

Si on dispose de copeaux ou de petits éclats de bois, ceux-ci subissent un premier broyage et sont mélangés aux sciures.

• Séchage :

La vis sans fin amène les sciures jusqu'à un tambour sécheur. Celles-ci sont mises en contact avec les fumées de combustion issues de la chaudière. Pour un séchage haute température, les fumées entrent à 700°C dans le séchoir et ressortent à 70 °C ; à basse température, elles pénètrent à 350°C pour ressortir à 70 °C également.

Le séchoir rotatif est muni d'un tambour à ailettes qui a pour effet d'augmenter la surface d'échange. Le fluide chaud peut

effectuer trois passages successifs à l'intérieur.

• Séparation :

L'ensemble fumées + sciures sèches passe ensuite dans un cyclone qui permet de séparer ces deux composants par gravité : les fumées sont évacuées par le haut de l'appareil, tandis que les sciures plus lourdes tombent dans le bas.

• Broyage :

La sciure doit être très homogène et très fine pour être pressée, le diamètre des particules doit être compris entre 0.2 et 3 mm. Elle passe donc dans un broyeur à marteau où les différences de granulométrie sont supprimées.

Il est interdit d'ajouter des substances chimiques à la sciure avant la granulation. Cependant il est possible d'incorporer des agents liants naturels, tels que de l'amidon de pomme de terre ou de maïs, à hauteur de 2%. Ce procédé simple et peu coûteux permet de réduire l'usure des pièces mécaniques de la presse à granuler en améliorant l'agglomération de la sciure. Dans d'autres procédés, on ajoute de la vapeur d'eau sèche à la sciure afin d'atteindre une humidité constante d'environ 12 %. Cela permet de libérer les composants polymériques du bois et d'augmenter les capacités d'agglomération de la sciure. Ces différents traitements peuvent être réalisés dans un mélangeur ou conditionneur.

• Granulation :

La sciure arrive dans la chambre de granulation où elle est pressée sur une filière par des galets (les pressions exercées peuvent atteindre les 100 bars). Il en résulte de longs fils continus qui sont ensuite coupés à la longueur désirée par des couteaux. La filière peut être cylindrique ou horizontale. Les plus petites presses artisanales permettent un débit de 50 kg de granulé par heure tandis que les plus grosses installations fournissent entre 3 et 4 tonnes dans le même temps en France. Dans d'autres pays les débits peuvent encore être plus importants.

Le débit fourni par une presse dépend de la dureté du bois donc de la difficulté à comprimer la sciure. En fonction du matériau, la presse va absorber plus ou moins d'énergie. Si elle éprouve des difficultés, elle va « forcer », sa consommation va donc augmenter. Afin de ne pas détériorer le matériel en cas de blocage, les presses sont munies d'une sécurité qui permet de disjoncter si elles demandent trop d'énergie.

• Refroidissement :

À la suite de cette opération où les pressions sont élevées, les granulés atteignent une température proche de 80°C. Ils passent donc dans un refroidisseur à air pour être amenés à température ambiante afin d'être stabilisés pour un nouveau stockage.

• Dépoussiérage :

Avant le conditionnement final et la livraison, les granulés sont débarrassés des poussières résiduelles encore présentes (fines) qui sont gênantes pour le bon déroulement de la combustion. Celles-ci seront réacheminées au début de la chaîne de production afin de subir un nouveau cycle. Là encore il existe plusieurs technologies de dépoussiérage.



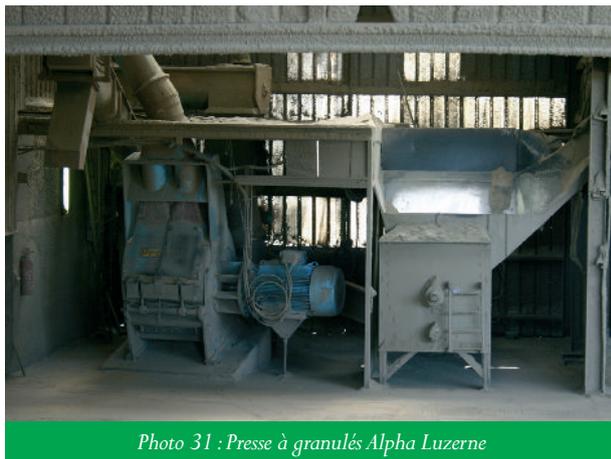


Photo 31 : Presse à granulés Alpha Luzerne

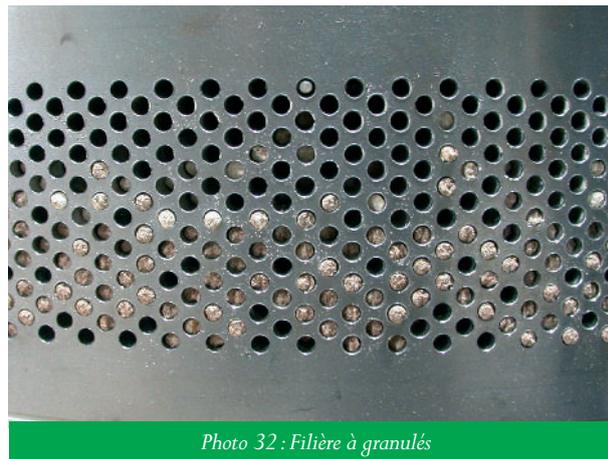
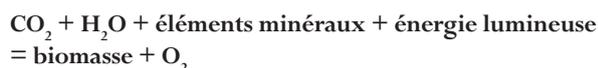


Photo 32 : Filière à granulés

Les propriétés des combustibles bois-énergie

La composition du bois

La production photosynthétique est décrite sommairement par l'équation suivante:



La composition élémentaire du bois complètement sec se compose en moyenne (en poids) de **49% de carbone (C)**, de **45,3 % d'oxygène (O)**, de **5,5 % d'hydrogène (H)**, de **0,2% d'azote (N)**. Cette composition va déterminer le pouvoir calorifique et les conditions dans lesquelles doit s'effectuer sa combustion.

Le comportement effectif des combustibles bois n'est pas seulement régi par les caractéristiques thermiques de la substance organique constituante. Les propriétés physiques et chimiques du combustible jouent également un rôle important dans le processus de combustion : humidité, granulométrie, masse volumique apparente, spécificité de la surface, taux de cendres, composition et propriétés des substances inorganiques (matières minérales, métaux, halogènes, métaux alcalins).

Côté organique, le bois se compose principalement de cellulose, de lignine et de substances minérales, qui formeront les cendres.

Tableau 8 : Répartition des différents constituants du bois

Constituants du bois	%
Cellulose	de 40 à 50 %
Hémicellulose	de 10 à 30 %
Lignine	de 15 à 30 %
Matières organiques et minérales	de 0,5 à 2 %

Concernant l'eau, on en distingue deux types dans le bois : l'eau de constitution des molécules ligneuses qui est liée au bois par voie chimique et l'eau d'imprégnation et de capillarité contenue dans les parois cellulaires et les pores du bois qui est liée au bois par voie physique. Cette eau peut être éliminée par séchage.

Le pouvoir calorifique

Variation du pouvoir calorifique en fonction de l'humidité

Le Pouvoir Calorifique Inférieur « PCI » exprimé en kWh/kg correspond à l'énergie produite par la combustion d'un combustible donné si l'on tient compte de la chaleur latente de vaporisation contenue dans la vapeur d'eau produite. La masse volumique et le PCI dépendent de l'essence et de l'humidité du bois. Le pouvoir calorifique du bois varie énormément en fonction de l'humidité. Cela est dû au fait qu'une part importante de l'énergie dégagée par la combustion de la biomasse est utilisée pour l'évaporation de l'eau, ce qui fait que le rendement énergétique soit affaibli. On pourra parler de PCS, pouvoir calorifique supérieur uniquement dans le cas des chaudières à condensation.

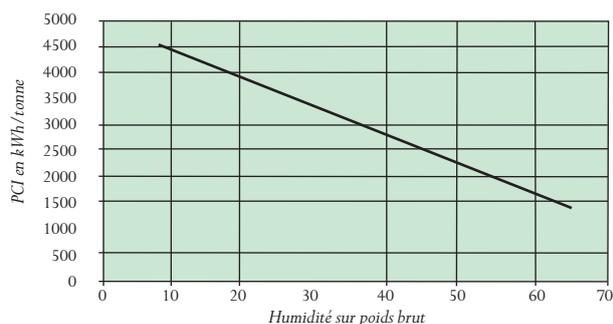


Tableau 9 : Humidité du bois en fonction du PCI (CTBA)

Le pouvoir calorifique inférieur sur poids brut d'un combustible bois peut être estimé à partir de son humidité et de son pouvoir calorifique à l'état anhydre grâce à la formule suivante :

$$PCI = \frac{PCI_0 \times (100 - H_{pb})}{100} - 0,006 \times H_{pb}$$

PCI, pouvoir calorifique inférieur en kWh/kg

H_{pb}, humidité sur poids brut en %

PCI₀, pouvoir calorifique inférieur du bois à l'état anhydre en kWh/kg



Tableau 10 : Variation du pouvoir calorifique en fonction de l'humidité (CTBA)

Humidité sur poids brut	PCI en kWh/tonne	Humidité sur poids brut	PCI en kWh/tonne	Humidité sur poids brut	PCI en kWh/tonne
8 %	4552	28 %	3432	48 %	2312
9 %	4496	29 %	3376	49 %	2256
10 %	4440	30 %	3320	50 %	2200
11 %	4384	31 %	3264	51 %	2144
12 %	4328	32 %	3208	52 %	2088
13 %	4272	33 %	3152	53 %	2032
14 %	4216	34 %	3096	54 %	1976
15 %	4160	35 %	3040	55 %	1920
16 %	4104	36 %	2984	56 %	1864
17 %	4048	37 %	2928	57 %	1808
18 %	3992	38 %	2872	58 %	1752
19 %	3936	39 %	2816	59 %	1696
20 %	3880	40 %	2760	60 %	1640
21 %	3824	41 %	2704	61 %	1584
22 %	3768	42 %	2648	62 %	1528
23 %	3712	43 %	2592	63 %	1472
24 %	3656	44 %	2536	64 %	1416
25 %	3600	45 %	2480	65 %	1360
26 %	3544	46 %	2424		
27 %	3488	47 %	2368		

PCI des différentes essences en fonction de l'humidité

La variation du PCI en fonction de l'essence est très faible. Ce qui va faire que les bois durs sont plus énergétiques n'est pas leur pouvoir calorifique, mais leur masse volumique. Nous

pouvons observer un pouvoir calorifique sensiblement supérieur chez les résineux.

Tableau 11 : Exemples de quelques PCI (Source CTBA)

Type de bois	PCI en fonction de l'Humidité (kWh/tonne)														
	Humidité	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%
	Essence														
Bois durs	chênes	4653	4377	4100	3824	3547	3271	2994	2718	2441	2165	1888	1612	1335	1059
	charme	4530	4260	3990	3720	3450	3180	2910	2640	2370	2100	1830	1560	1290	1020
	hêtre	4596	4323	4049	3776	3502	3229	2955	2682	2408	2135	1861	1588	1314	1041
	frêne	4663	4386	4109	3832	3555	3278	3001	2724	2447	2170	1893	1616	1339	1062
	orme	4815	4530	4245	3960	3675	3390	3105	2820	2535	2250	1965	1680	1395	1110
	acacia	4720	4440	4160	3880	3600	3320	3040	2760	2480	2200	1920	1640	1360	1080
	bouleau	4720	4440	4160	3880	3600	3320	3040	2760	2480	2200	1920	1640	1360	1080
	châtaignier	1080	4620	4330	4040	3750	3460	3170	2880	2590	2300	2010	1720	1430	1140
	marronnier	4910	4620	4330	4040	3750	3460	3170	2880	2590	2300	2010	1720	1430	1140
	fruitiers	4625	4350	4075	3800	3525	3250	2975	2700	2425	2150	1875	1600	1325	1050
érables	5005	4710	4415	4120	3825	3530	3235	2940	2645	2350	2055	1760	1465	1170	
Bois tendres	tilleul	4625	4350	4075	3800	3525	3250	2975	2700	2425	2150	1875	1600	1325	1050
	aulne	4625	4350	4075	3800	3525	3250	2975	2700	2425	2150	1875	1600	1325	1050
	peupliers	4530	4260	3990	3720	3450	3180	2910	2640	2370	2100	1830	1560	1290	1020
	saules	4530	4260	3990	3720	3450	3180	2910	2640	2370	2100	1830	1560	1290	1020
	pin sylvestre	5005	4710	4415	4120	3825	3530	3235	2940	2645	2350	2055	1760	1465	1170
	pin maritime	4910	4620	4330	4040	3750	3460	3170	2880	2590	2300	2010	1720	1430	1140
	pin Weymouth	4910	4620	4330	4040	3750	3460	3170	2880	2590	2300	2010	1720	1430	1140
	sapins	4815	4530	4245	3960	3675	3390	3105	2820	2535	2250	1965	1680	1395	1110
	épicéa	4910	4620	4330	4040	3750	3460	3170	2880	2590	2300	2010	1720	1430	1140
	mélèze	5005	4710	4415	4120	3825	3530	3235	2940	2645	2350	2055	1760	1465	1170
douglas	4910	4620	4330	4040	3750	3460	3170	2880	2590	2300	2010	1720	1430	1140	



Les propriétés des plaquettes

Trois paramètres primaires caractérisent les plaquettes combustibles :

- la granulométrie,
- l'humidité,
- le pouvoir calorifique.

Des paramètres secondaires pourront également être définis :

- le taux de cendres
- le taux de fines,
- la présence de corps étrangers,
- la présence de moisissure.

Les critères à prendre en considération sont :

• La granulométrie :

Elle détermine les solutions techniques et les dimensionnements pour le stockage, le transfert dans la chaudière et la combustion. Elle influence le foisonnement du combustible et donc le volume qu'il occupe. Pour une même masse de bois, les variations de volume peuvent aller jusque 30 % entre de fines ou de grosses plaquettes.

Par ailleurs, les plaquettes fines et sèches sont nécessaires aux petites chaudières automatiques dans l'habitat individuel ou pour les petits réseaux de chaleur.

Les plaquettes de granulométries plus grossières conviennent quant à elles aux chaufferies de tailles industrielles, soit en général supérieures à 600 kW.

• L'humidité :

Elle représente la quantité d'eau libre présente dans le combustible bois. Elle peut être exprimée en pourcentage sur poids brut (Hpb) et plus rarement en pourcentage sur poids sec (Hps). Les équivalences sont calculées d'après la formule :

$$Hps = \frac{100 \times Hpb}{100 - Hpb}$$

• Le pouvoir calorifique :

Le pouvoir calorifique du bois est la quantité d'énergie théoriquement récupérable lors de sa combustion. La valeur retenue pour les combustibles solides est le PCI (Pouvoir calorifique Inférieur), c'est-à-dire la quantité d'énergie récupérée moins celle consommée pour l'évaporation de l'eau contenue dans le bois à l'origine (eau à l'état vapeur dans les fumées).

Le pouvoir calorifique du bois varie en fonction de son humidité mais également de sa composition (par exemple taux de carbone contenu dans le bois).

L'humidité et le pouvoir calorifique du bois à l'état anhydre permettent de déterminer le pouvoir calorifique réel du bois sur poids brut suivant la formule :

$$PCI = \frac{PCI_0 \times (100 - Hpb)}{100} - 0,006 \times Hpb$$

PCI, pouvoir calorifique inférieur en kWh/kg

Hpb, humidité sur poids brut en %

PCI₀, pouvoir calorifique inférieur du bois à l'état anhydre en kWh/kg

Le contenu énergétique des plaquettes forestières vertes varie de 2200 à 2800 kWh par tonne pour une humidité de 40 à 50 %.

Pour des plaquettes forestières sèches, le contenu est 3300 à 3900 kWh par tonne pour une humidité de 20 à 30 %.

• Le taux de cendres :

Les cendres sont les résidus de la combustion du bois. Elles sont composées d'imbrûlés et de minéraux : chaux, magnésie, potasse, silice, acide phosphorique et sels alcalins. Suivant l'essence et la partie de l'arbre utilisée (aubier, écorce, branche), le taux de cendres du bois peut varier fortement. Ces taux peuvent également augmenter avec la présence de terre ou de cailloux provenant de la manutention du bois.

• Le taux de fines :

Les fines sont les particules de taille inférieure à 1 mm, résidus des opérations de transformation et de transport du bois. En général pour le bois déchiqueté, il ne doit pas dépasser 5 % de la masse totale du bois.

Il faut définir une qualité en cohérence avec la chaudière dans laquelle le bois est brûlé. De manière générale, plus le bois est brûlé dans de petites chaudières plus les exigences au niveau de la qualité seront importantes.

• Les corps étrangers :

Ils sont tous proscrits : métal, pierres, sable, terre, glace, plastique, ... chacun apportant son lot d'inconvénients.

• Les moisissures :

Les moisissures sont le reflet d'une dégradation de la matière. C'est donc le signe d'un produit qui ne correspondra pas aux attentes du client surtout en matière de pouvoir calorifique.

Par ailleurs, il faut savoir que certaines moisissures sont nocives pour les poumons.

Il faut donc les éviter et si elles sont là les manipuler avec un masque et en avertir le client si vous voulez absolument les livrer : une mesure du PCI s'avère alors utile.

• Méthodes de mesures :

Les mesures d'humidité et de granulométrie peuvent être réalisées simplement par soi-même, pour le reste il faut avoir recours aux services d'un laboratoire. Pour les mesures d'humidité en étuve, tous les laboratoires agricoles en disposent.

• Mesure d'humidité :

La méthode la plus précise consiste à prélever un échantillon et à le placer dans une étuve à 104°C jusqu'à stabilisation du poids (au moins 24 h). D'autres moyens de mesures peuvent être utilisés mais avec moins de fiabilité (seau de mesure, micro-ondes). Les mesures peuvent être réalisées par le fournisseur de bois déchiquetés ou par l'utilisateur : en fait par celui qui a besoin de l'information.

• Granulométrie et taux de fines :

la seule méthode est le tamis fabriqué avec les mailles données par le cahier des charges du client : une maille pour la granulométrie supérieure et une pour les fines.



Les propriétés du bois de chauffage

Connaître les caractéristiques du bois de chauffage

- **L'essence du bois** est une caractéristique importante à prendre en considération
- **L'humidité est le critère qui a le plus de conséquences sur la qualité** de la combustion: pour un fonctionnement sans problème, il est en effet nécessaire d'utiliser du bois sec, avec un taux d'humidité inférieur à 25 % sur masse brute,
- **Le façonnage des bûches:** Il est souhaitable de proposer des bûches de longueur et de diamètre adaptés à la taille du foyer. C'est la raison du façonnage en 50, 33 ou 25 cm. Les bûches doivent se présenter fendues.
- **Le cubage des bûches** est un facteur à prendre compte lors du calcul du stockage et de la livraison.

Influence de l'essence

Plus le bois est dur, plus le contenu énergétique d'un volume de bûches est important. La connaissance de l'essence d'un combustible bois renseigne sur le contenu énergétique d'un volume de bois donné. Les essences sont classées en dures et tendres. Les bois durs (chêne, charme, hêtre, frêne, acacia, etc.) sont plus lourds et plus énergétiques par une même unité de volume que les bois tendres (aulne, peuplier, saule, tilleul et les résineux).

Cependant, par unité de poids, le pouvoir calorifique du bois varie très peu selon les essences. Les résineux ont même un PCI légèrement supérieur (plus ou moins 5 % près). Cette variation n'est pas assez importante pour être considérée et est généralement négligée.

Alors la raison pour laquelle le chêne est plus énergétique que l'épicéa n'est pas du au fait qu'il ait un pouvoir calorifique supérieur (à la même humidité, un kilogramme de bois de chêne dégage à peu près la même chaleur qu'un kilogramme de bois d'épicéa) mais parce qu'il est plus dense.

Valeurs du contenu énergétique en fonction de l'essence et de l'humidité

Tableau 12 : Valeurs du contenu énergétique en fonction de l'essence et de l'humidité

Type de bois	Humidité sur brut	Poids moyen d'un stère de bois	Pouvoir calorifique inférieur	Contenu énergétique	Equivalence en litres de fuel
Feuillus durs	20 %	530 kg/stère	3,9 kWh/kg	2070 kWh/stère	210 l/stère
	30 %	600 kg/stère	3,3 kWh/kg	1980 kWh/stère	200 l/stère
Feuillus tendres et résineux	20 %	380 kg/stère	3,9 kWh/kg	1480 kWh/stère	150 l/stère
	30 %	440 kg/stère	3,3 kWh/kg	1450 kWh/stère	145 l/stère

Commentaires

- Les bois durs comme le chêne, le charme, le hêtre ou le frêne sont généralement perçus comme les meilleurs bois de chauffage.
- L'acacia, le châtaignier et le résineux sont des bons bois de chauffage mais produisent des étincelles.
- Les bois tendres comme le bouleau, le peuplier, le tilleul font des très bons bois de chauffage grâce à leurs « Flambant ».
- Souvent les constructeurs déconseillent une utilisation régulière de résineux comme bois de chauffage pour des raisons d'autonomie, d'encrassement et de goudronnage de l'installation. Seuls les appareils de chauffage bien régulés, ceux à feu vif (cheminées ouvertes et poêles à accumulation) et ceux fonctionnant avec un ballon d'accumulation permettent de brûler le résineux sans inconvénient.

Influence de la dimension des bûches

Plus les bûches sont courtes et fendues, plus leur combustion sera bonne. Pour les chauffages à bois, plusieurs tailles de combustibles sont possibles : 1 m, 50 cm, 33 cm, 25 cm ou chutes courtes. Le choix de l'appareil de chauffage a différentes conséquences :

Dimensions des bûches	Conséquences et commentaires
1 mètre	Uniquement pour cheminées à foyer ouvert ou chaudières à grand foyer. Pour les chaudières, prévoir un ballon d'accumulation pour prévenir les ralentis.
50 cm ou 33cm	Taille adaptée aux chaudières à petit foyer et aux foyers fermés et cheminées-chaudières.
33cm et 25 cm	Taille adaptée aux poêles, cuisinières et cuisinières-chaudières.
Petit bois et chute en vrac	Chaudières à porte-trémie uniquement.

La taille des bûches, tant en diamètre qu'en longueur, est un critère pratique important pour la qualité de la combustion. Il sera en effet préférable d'utiliser des bûches de faibles longueurs (25-33 cm) et fendues en section de 10 à 15 cm de diamètre maximum.



Tableau 13: Exemples de correspondance du stère pour du bois plein, bûches en 1 m, 50 cm, 33 cm

CONVERSIONS Valeur en m ³	Bûches 1 m	Bûches 50 cm	Bûches 33 cm
Chiffres du CTBA (France)	1	0,8	0,7
Chiffres en Allemagne	1	0,9	0,79

Cubage du bois de chauffage

Le sciage d'un stère en réduit le volume. L'unité de mesure la plus métrique est le stère. Le stère est l'équivalent d'un cube de bûches empilées de 1 mètre de côté. Les autres unités non métriques sont à proscrire, car elles ne sont pas uniformes suivant les régions. Le tableau suivant donne les correspondances du stère pour des bûches de 1 m, 50 cm et pour du bois plein (m³). Par exemple 1 m³ plein donne après fendage 1,5 stères.

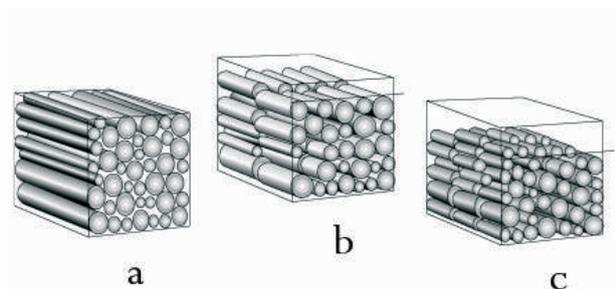


Schéma 2 : Cubage du bois de chauffage

Le stère initial en bûches de 1 mètre de longueur occupe par définition un volume apparent de 1 m³ (A).

En France, il n'occupe plus que 0,8 m³ en moyenne une fois que les bûches sont recoupées en 0,5 m de longueur (B) et plus que 0,7 m³ si les bûches sont recoupées en 0,33 m (C).

L'explication de ce phénomène est que le rangement est plus efficace lorsque les bûches sont plus courtes, car elles laissent une quantité de vides moindre.

Les stères peuvent se présenter aussi en fagots ronds.

Le stère a été critiqué à cause des ambiguïtés qu'il peut provoquer car le poids d'un stère est très variable selon le diamètre, le façonnage, et la rectitude des bûches. Dans d'autres pays, comme l'Italie, le bois de chauffage est mesuré au poids, ce qui est considéré par quelques-uns comme plus adéquate une fois vérifiée l'humidité.

L'utilisation du poids comme unité de mesure a des avantages et des inconvénients : du bois humide est beaucoup plus lourd et moins énergétique et il risque d'être vendu plus cher. Par contre, avec l'humidité contrôlée, le poids est une mesure plus exacte parce qu'il renseigne plus précisément sur le contenu énergétique que le volume. Le contenu énergétique du volume peut être variable selon l'essence et la forme des bûches.

Influence de l'humidité du bois

Plus le bois est sec, plus son contenu énergétique est important. L'humidité est le critère principal de qualité d'un bois de chauffage (cf. chapitre sur le séchage). Les bûches ne doivent pas excéder 25 % d'humidité sur brut lorsqu'elles sont brûlées. Le pouvoir calorifique du bois est inversement proportionnel à sa teneur en eau. Celle-ci détermine la vitesse et l'efficacité de la combustion. Si nous tentons de brûler un bois humide, il s'enflammera difficilement et une bonne partie de l'énergie de la combustion servira à l'évaporation de l'eau, ce qui se traduira par une perte importante d'efficacité. De plus, la combustion n'attendra pas les températures nécessaires au craquage de toutes les molécules et il s'en suivra une pollution de l'atmosphère (la fumée), un encrassement de l'appareil (goudron) et du conduit de fumée (bistre). Par exemple, 1 kg de bois à 50 % d'humidité dégagera 2 kWh tandis qu'à 20 % d'humidité, il dégagerait 4 kWh. Cela veut dire qu'à 50 % d'humidité nous consommerons 2 fois plus qu'à 20 %. C'est pourquoi le séchage doit être planifié de façon à arriver au moment de la vente avec une humidité proche au 20-25 %.

Les granulés ont les caractéristiques suivantes :

- Masse volumique : 650 kg/m³
- Contenu énergétique: 4600 kWh/tonne
- Taux de cendre de 0,5 à 3 %
- Diamètre 6-9 mm. La fabrication en diamètre 6 mm permettrait une meilleure rentabilité
- Longueur 20-30 mm
- Humidité inférieure à 10 %

Tableau 14 : Influence de l'humidité sur le pouvoir calorifique

Humidité du bois	Pouvoir calorifique
50 – 60 %	2,0 kWh/kg de bois
25 – 35 %	3,4 kWh/kg de bois
15 – 25 %	4,0 kWh/kg de bois



Les propriétés des granulés de bois

Les principaux paramètres qui caractérisent les granulés de bois sont comme pour les autres combustibles bois :

- La granulométrie
- L'humidité
- Le pouvoir calorifique
- La masse volumique
- Le taux de cendres

• La granulométrie

Le granulé de bois est un produit manufacturé (cylindre de sciure compressée) qui se présente sous la forme d'un cylindre de 6 à 9 mm de diamètre et de longueur moyenne de 3 cm.

• L'humidité et pouvoir calorifique

Ce combustible très dense, dispose d'un pouvoir calorifique de 4600 kWh à 5000 kWh par tonne avec une humidité sur poids brut de 8 % ce qui en fait un produit très sec.

• La masse volumique

Sa masse volumique est de 0,65 à 0,7 t/m³ facilitant le transport et le stockage. Très fluide, il peut être acheminé par système pneumatique et aller là où les autres combustibles solides ne

peuvent être acheminés.

• Le taux de cendre

Il dispose du taux de cendre le plus bas du marché des biomasses avec de 0,5 à 1%, rendant les opérations de maintenance beaucoup plus légères qu'avec les autres combustibles solides.

Sa régularité en fait le combustible le plus facile à utiliser et le plus performant au niveau énergétique. C'est le seul combustible biomasse capable de conserver une masse, un volume, une humidité et un contenu énergétique stables dans le temps.

Le granulé de bois peut paraître comme un produit simple au premier abord et donc facile à fabriquer. Ce n'est pas le cas, il s'agit contrairement aux autres combustibles bois, d'un combustible industriel. On peut s'attendre à ce que des sociétés avec des histoires et savoir-faire très différents se lancent dans sa production et sa commercialisation, d'où une grande disparité de qualité. La mise en place d'une chartre qualité offre une solution à ces problèmes. Elle fournit les paramètres techniques sur le combustible. La charte qualité ITEBE développée dans le cadre du French Pellet Club, définit dans le tableau suivant les caractéristiques des granulés en fonction de leur usage :

Tableau 15 : Les propriétés du granulé de bois

Paramètres	Unités	Poêle	Chaudière
Longueur (90% en masse)	mm	10 à 30	10 à 30
Diamètre	mm	6 +/- 1	6 à 9 +/- 1
Contenu en eau	%	<10	<10
Masse volumique apparente	kg/m ³	>650	>650
Masse volumique spécifique	kg/m ³	1 150	1 150
PCI brut (Pouvoir Calorifique Inférieur)	kWh/kg	>4,6	>4,6
Teneur en cendres minérales	%	<0,7	<1,5
Teneur en Na ⁺	%	<0,03	<0,03
Teneur en chlore - Cl	%	<0,03	<0,03
Teneur en soufre - S	%	<0,05	<0,08
Teneur en azote - N	%	<0,3	<0,3
Teneur en liants naturels (amidon, mélasse, huile végétale)	%	Affichage obligatoire de la nature et de la teneur limitée à 2%	
Tolérance bois de rebut	Qualitatif	Interdit	



Organisation de la production

Les logistiques de production de plaquettes

Les schémas qui suivent vont décrire les grands types d'organisation de production. L'ensemble des possibilités de ruptures de charge n'est pas passé en revue car nous en avons déjà parlé précédemment dans le texte et car cela aurait embrouillé le classement que nous avons réussi à présenter de manière très synthétique.

Le déchetage sur coupe



Photo 33 : Déchetuse automotrice sur coupe

Production de plaquettes forestières sur la coupe avec une automotrice	
Type de chantier	Coupes définitives et 1ères éclaircies $\varnothing < 30$ cm
Abattage directionnel	Manuel ou mécanisé avec une mise en ligne des bois pour diminuer la manutention par la déchetuse
Débardage des plaquettes	Tracteur et benne de débardage en complément de la déchetuse ou seulement la déchetuse automotrice
Transport	Conteneurs de 30 à 40 m ³ à prévoir en nombre suffisant
Aspects économiques	10 €/MAP rendu humide pour des chantiers ultra-optimisés (Hedeselskabet, Danemark)

Avantages	Inconvénients
<p>Pas de façonnage des perches (gain de temps lors de l'abattage)</p> <p>Pas de débardage effectué à l'avance</p>	<p>Topographie & sol humide peut empêcher l'utilisation de cette méthode</p> <p>Impacts significatifs sur les sols forestiers</p> <p>Obligation de mobiliser trois engins en même temps</p> <p>Perte de temps si la déchetuse effectue le débardage</p> <p>Solution risquée si effectuée en flux tendu</p> <p>Capacité de déchetage faible $\varnothing < 30$ cm</p> <p>Coupe non libérée rapidement</p>

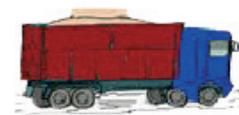




1. Abattage



2. Déchiquetage sur coupe avec une automotrice équipée d'une benne élévatrice



3. Transport et livraison de la forêt à la chaufferie

Source illustrations: TIMBER/JCK-SYNTHEC-ITEBE

Schéma 3 : Déchiquetage sur coupe (Source ITEBE)

Le déchiquetage sur tas débardé



Photo 34 : Déchiqueteuse bord de chemin forestier



Photo 35 : Déchiqueteuse bord de route



1. Abattage



2. Débardage des rémanents en bord de route

3. Stockage et séchage en perches



4. Déchiquetage sur bord de route



5. Transport et livraison à la chaufferie

Source illustrations: TIMBER/JCK-SYNTHEC-ITEBE

Schéma 4 : Déchiquetage sur tas débardé (Source ITEBE)



Production de plaquettes forestières en bord de route	
Choix du peuplement	Coupes définitives et 1ères éclaircies Ø < 30 cm
Abattage	Manuel ou mécanisé
Débardage	Par porteur à ranchers
Déchiquetage	Déchiquetage bord de route Possibilité de sécher les bois avant de les déchiqueter
Aspects économiques	Conteneurs ou semi-remorques
Transport	12 à 15 €/MAP (France)

Avantages
La déchiqueteuse fonctionne à 100 % du temps
Les engins fonctionnent séparément
Solution la plus facile pour l'approvisionnement de chaufferies de taille moyenne

Inconvénients
Nécessité de disposer d'un vaste champ d'action en bord de route

Le déchiquetage sur plate-forme

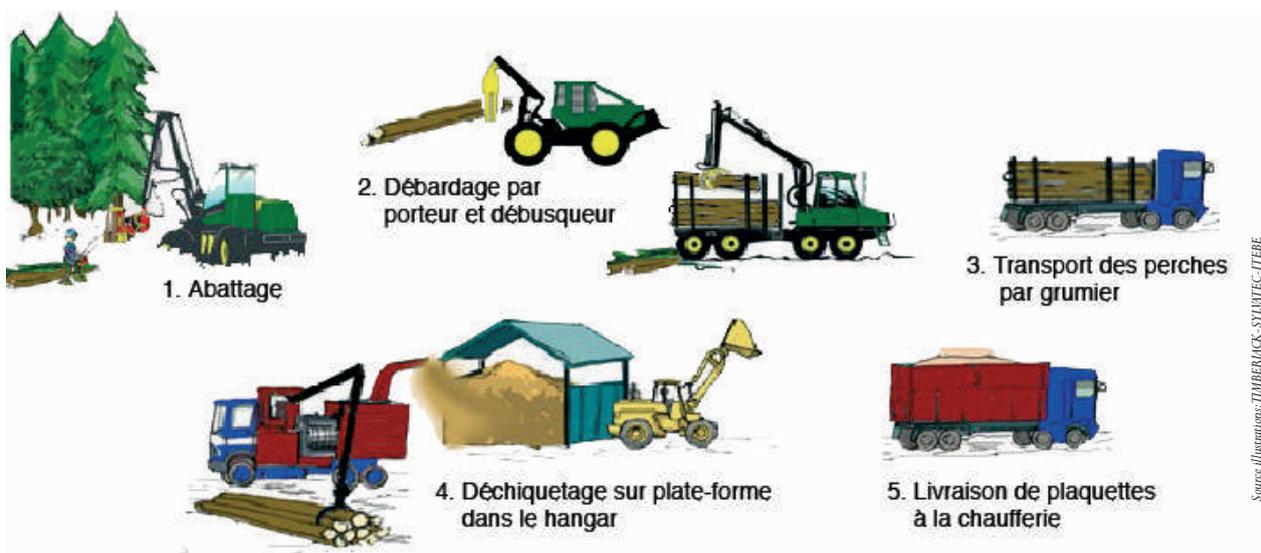


Schéma 5 : Déchiquetage sur plate-forme



Production de plaquettes forestières sur plate forme	
Choix du peuplement	Arbres entiers $\varnothing < 90$ cm
Abattage	Manuel ou mécanisé, façonnage en perches de 6 à 15 m
Débardage	Par porteur et/ou par débusqueuse
Transport	Par grumiers (perches)
Déchiquetage	Déchiquetage sur une plate forme ou sur le site de la chaufferie Possibilité de laisser sécher les bois avant de les déchiqueter
Aspects économiques	10 à 12 €/MAP

Avantage
Installation d'un broyeur de grande capacité et réduction des coûts
Opérations découplées donc pas de problème en cas de panne
Utilisation d'engins classiques
Grande sécurité d'approvisionnement

Inconvénients
Uniquement adapté aux gros bois en grand volume donc installation de puissance importante (> 5 MW)
Pas de séchage en forêt mais plutôt en tas sur la plate forme

Le sous cas de la mise en ballots

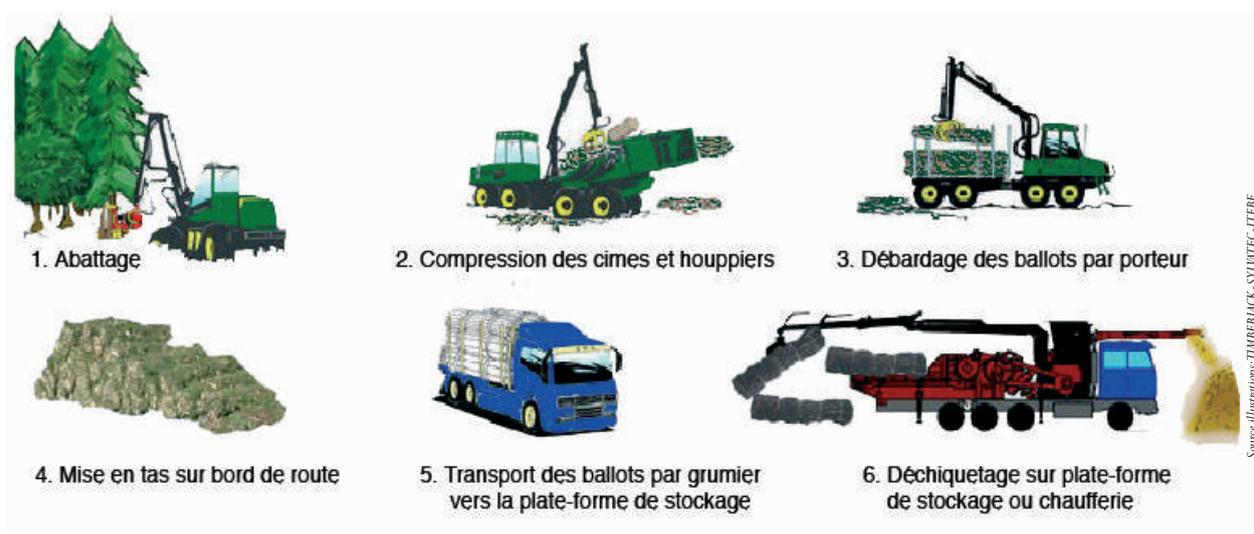


Schéma 6 : Déchiquetage sur plate-forme avec mise en ballots



Production de plaquettes forestières sur plate forme avec mise en ballots	
Choix du peuplement	Uniquement petits rémanents
Abattage	L'abatteuse rassemble les cimes (abatteuse groupeuse)
Mise en ballot	Production à partir de cimes et branches de plus de 3m de longueur. Ballots de 0,6 à 0,8 m de diamètre liés tous les 40 cm. Une "bundling machine" produit près de 20 à 30 ballots par heure chacun pesant environ 0,4 à 0,7 tonnes (source TIMBERJACK)
Débardage	Par porteurs forestiers
Transport	Sur camions classiques à ranchers
Aspects économiques	Solution chère puisqu'une étape supplémentaire est ajoutée

Avantages
<p>Installation d'un broyeur de grande capacité – réduction des coûts</p> <p>Meilleure mobilisation des petits produits</p> <p>Possibilité de transport de branches</p> <p>Les appareils travaillent séparément</p>

Inconvénients
<p>Solution chère</p> <p>Adapté uniquement pour des rémanents de petites taille (diamètre 3 cm)</p> <p>N'est adaptée que pour des installations de grandes puissances</p>

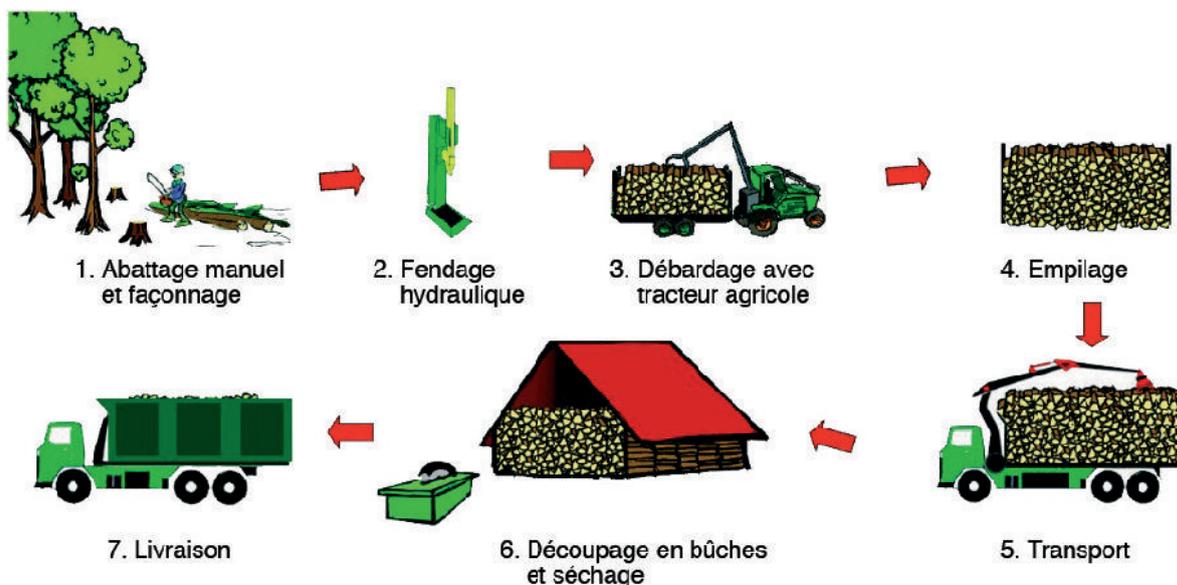
Les logistiques de production de bois de chauffage

Production traditionnelle de bûches (Cas 1)

La production traditionnelle de bûche est celle dont les prix de revient sont les plus élevés si le travail est rémunéré légal-

ment. C'est également celle qui a productivité est la plus basse : cette pratique est à réserver pour les très petites productions.





Source illustrations: TIMBER/JICK-STUMATEC-ITEBE

Schéma 7 : Production traditionnelle de bûches (Cas 1)

Etapas		Opérations
1	Travaux sur la coupe	Abattage, ébranchage et débit à la tronçonneuse en longueur de 1 mètre
2		Fendage en 1m sur coupe, avec entraînement de la fendeuse par tracteur
3		Débardage des bûches sur remorque forestière munie ou non d'un grappin
4		Empilage manuel ou à la grue pour stockage et séchage en bord de route (6 à 18 mois), avec ou sans sciage préalable.
5	Transport	Livraison chez le client ou transport vers une plate forme pour sciage et/ou séchage avant vente, manutention manuelle ou au grappin
6	Plate-forme de sciage et/ou séchage	Découpe en 50, 33 ou 25 cm, sous plate-forme de sciage si pas fait au préalable sur la coupe
		Séchage sous hangar pour vente de bois sec (6 mois) ou à l'air libre (12 mois)
7	Livraison bois scié	Transport routier chez le client (consommateur ou commerçant) en vrac avec des bennes ou empilé sur plateau (manutention manuelle ou au grappin)

Equipements nécessaires :

- Tronçonneuses
- Fendeuse hydraulique
- Tracteur agricole
- Remorque forestière
- Eventuellement grue à grappin sur tracteur ou sur remorque

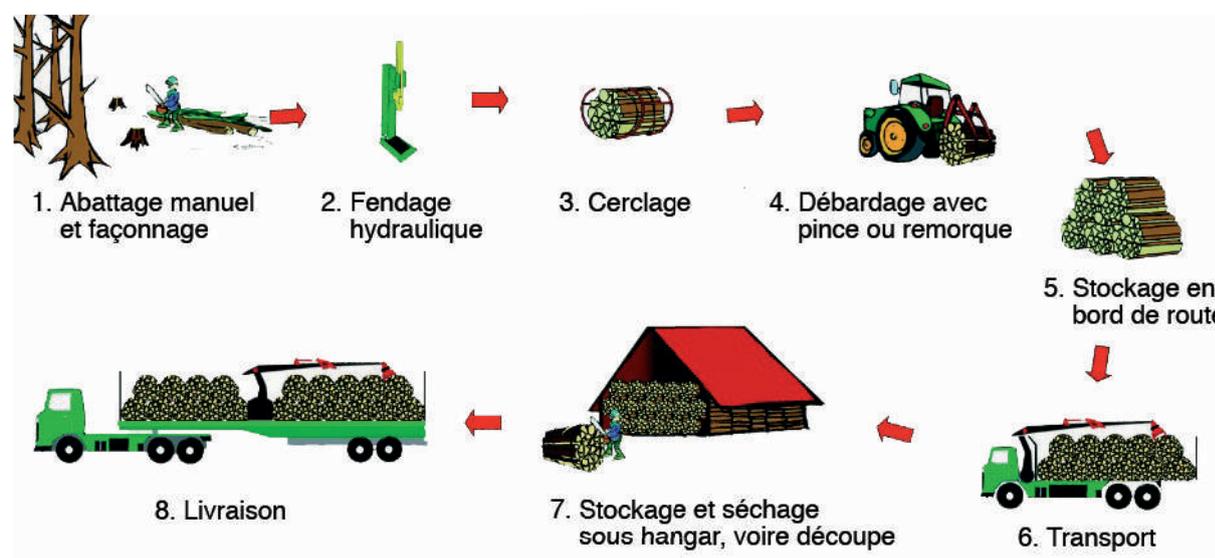
- Scie circulaire ou à ruban, fixe ou mobile
- Benne agricole ou porteur routier à plateau ou à benne
- Terrain de travail et de stockage
- Eventuellement bâtiment de séchage et stockage pour vente de bois sec.



Production de bûches avec cerclage en 1m (cas 1bis)

Récolte en rondins de 2, 4 ou 6 m ou en perches et sciage-fendage des bûches sur place. La production mécanisée en forêt

est la logistique la plus performante avec des investissements et des équipements classiques.



Source Illustrations: TIMBER/JACK-SYLVAITEC-ITEBE

Schéma 8 : Production de bûches avec cerclage en 1m (cas 1bis)

Etapes		Opérations
1	Travaux sur la coupe	Abattage, ébranchage et débit à la tronçonneuse en longueur de 1 mètre,
2		Fendage en 1 m sur coupe, avec entraînement de la fendeuse par tracteur
3		Mise en ballot avec gabarit de cerclage (enstèreuse)
4		Débardage avec pince ou sur remorque forestière avec grue
5		Stockage en bord de route voire séchage (6 à 18 mois)
6	Transport	Livraison chez le client ou transport vers une plate forme pour sciage et/ou séchage avant vente, manutention au grappin
7	Plate-forme	Eventuellement découpe des fagots en deux (50cm)
8		Stockage et séchage sous abri (6 mois)
9	Livraison	Transport routier chez les client en fagots de 0,5 ou 1 m



Equipements nécessaires :

- Tronçonneuses,
- Fendeuse hydraulique
- Gabarit de cerclage,
- Tracteur agricole,
- Terrain de travail et de stockage

- Grue avec grappin ou pince de débardage
- Tracteur routier et semi-remorque à plateau et ranchers, ou avec grue à grappin
- Remorque forestière ou agricole
- Eventuellement bâtiment de stockage et séchage

Production mécanisée de bûches en forêt (cas 2)

Récolte en rondins de 2, 4 ou 6 m ou en perches et sciage-fendage des bûches sur place. La production mécanisée en forêt

est la logistique la plus performante avec des investissements et des équipements classiques.

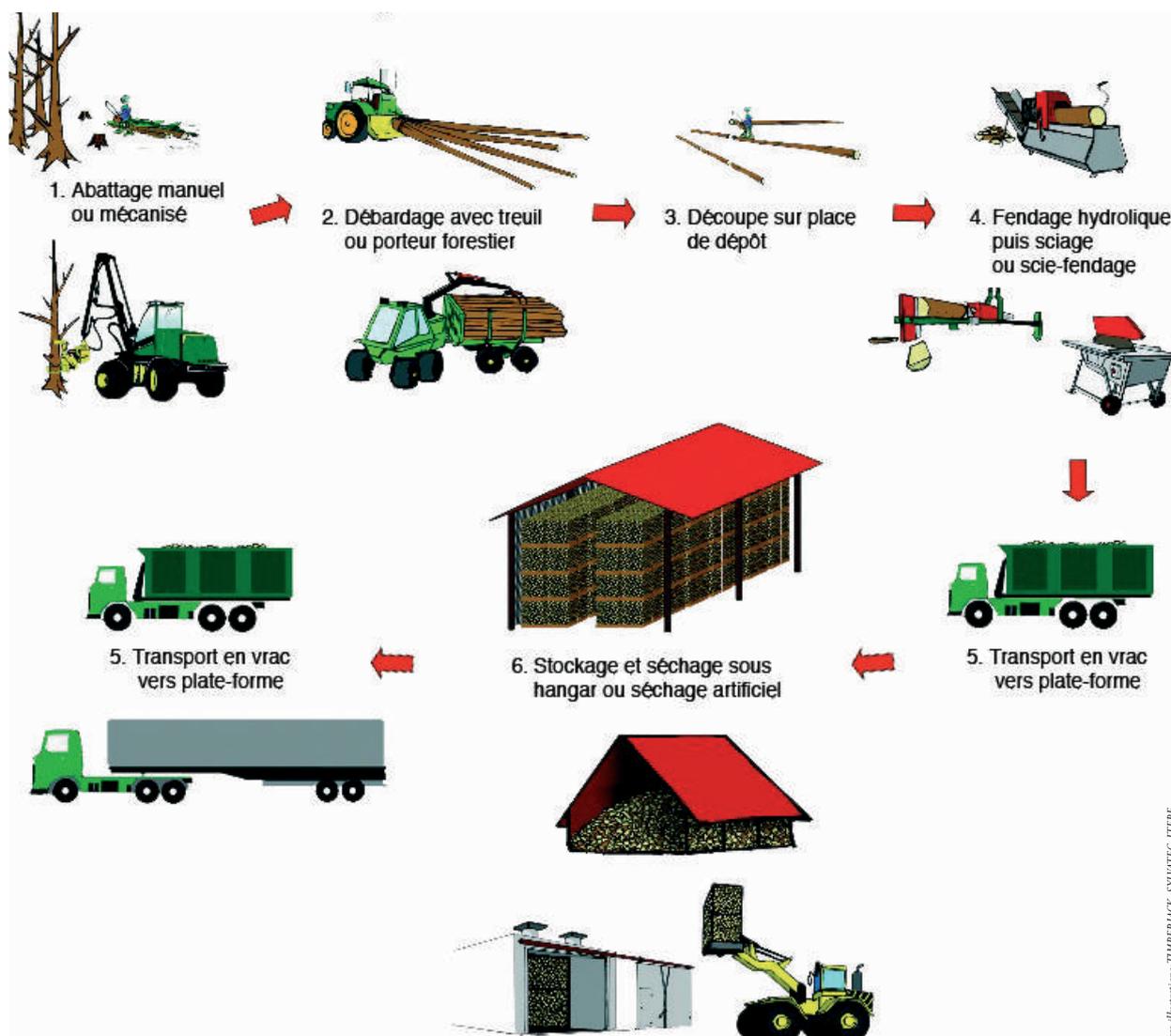


Schéma 9 : Production mécanisée de bûches en forêt

Equipements nécessaires :

- Tronçonneuses et éventuellement abatteuse
- Tracteur forestier avec treuil ou pince à grumes, ou porteur forestier ou remorque forestière avec tracteur agricole,
- Fendeuse hydraulique et scie circulaire à bûches ou combiné scie-fendeuse

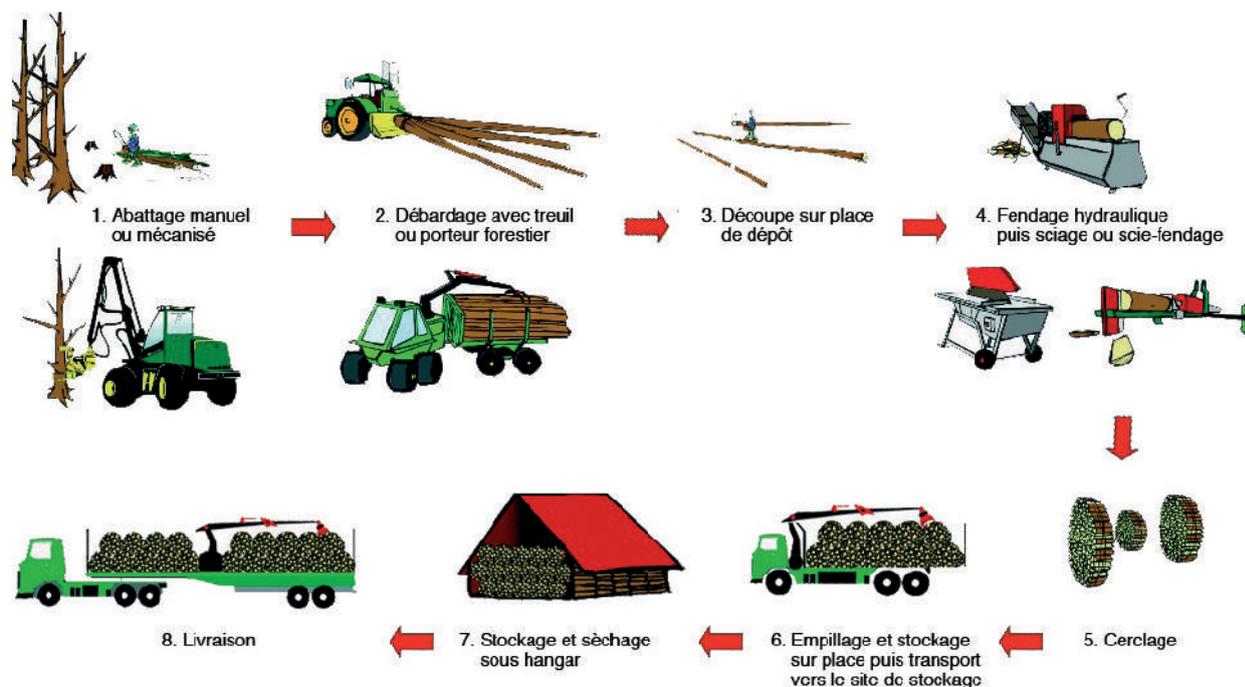
- Tracteur routier et semi-remorque à plateau et ranchers, éventuellement avec grue à grappin
- Bâtiment de stockage et de séchage
- Terrain de travail et de stockage



Production mécanisée de bûches en forêt avec cerclage (Cas 2bis)

Récolte en rondins de 2, 4, 6 m ou en perches et conditionnement sur place de dépôt avec cerclage. La production mécanisée en forêt avec cerclage permet d'optimiser les opérations de manutention. Elle permet en outre la fourniture de magasins

ou de clients directement en bois sciés depuis la forêt. Hormis un séchage poussé, toutes les opérations peuvent ainsi se faire à partir de la forêt.



Source illustrations : TIMBERJACK - SYLVITEC - IREB

Schéma 10 : Production mécanisée de bûches en forêt avec cerclage (Cas 2bis)

Étapes		Opérations
1	Travaux sur la coupe	Abattage, ébranchage et débit, manuel ou mécanisé en 2, 4, 6 m
2		Débardage : - soit en perches avec un tracteur muni d'un treuil ou d'une pince à grumes - soit en rondins sur un porteur ou une remorque forestière
3	Travaux sur aire de dépôt	Débitage en la longueur adapté à la scie-fenduse
4		Fabrication des bûches - soit par fendage, puis sciage en 50, 33 ou 25 cm - soit par scie fendage en 50, 33 ou 25 cm à partir de rondins en 2m
		Cerclage (1m, 50, 33 ou 25 cm)
5		Stockage : - Empilage à la grue et stockage sur place - Livraison chez le client ou transport vers une plate forme pour séchage avant vente. Transport sur plateau
6	Plate-forme	Stockage (séchage pendant 6 mois)
7	Livraison	Transport sur plateau chez le client



Equipements nécessaires :

- Tronçonneuses et éventuellement abatteuse
- Tracteur forestier avec treuil ou pince à grumes, ou porteur forestier ou remorque forestière avec tracteur agricole
- Fendeuse hydraulique et scie circulaire à bûches ou combiné scie-fendeuse

- Enstèreuse
- Tracteur routier et semi-remorque à plateau et ranchers, et avec grue à grappin
- Bâtiment de stockage et de séchage
- Terrain de travail et de stockage.

Production mécanisée de bûches sur plate-forme (cas 3)

Récolte en rondins de 2, 4 ou 6m ou en perches et conditionnement. La plate forme de scie fendage de bois de chauffage est l'organisation de production la plus rationnelle. Elle se

révélera également la moins chère pour des marchés importants, si toutefois les dernières phases de conditionnement-séchage sont bien appréhendées.

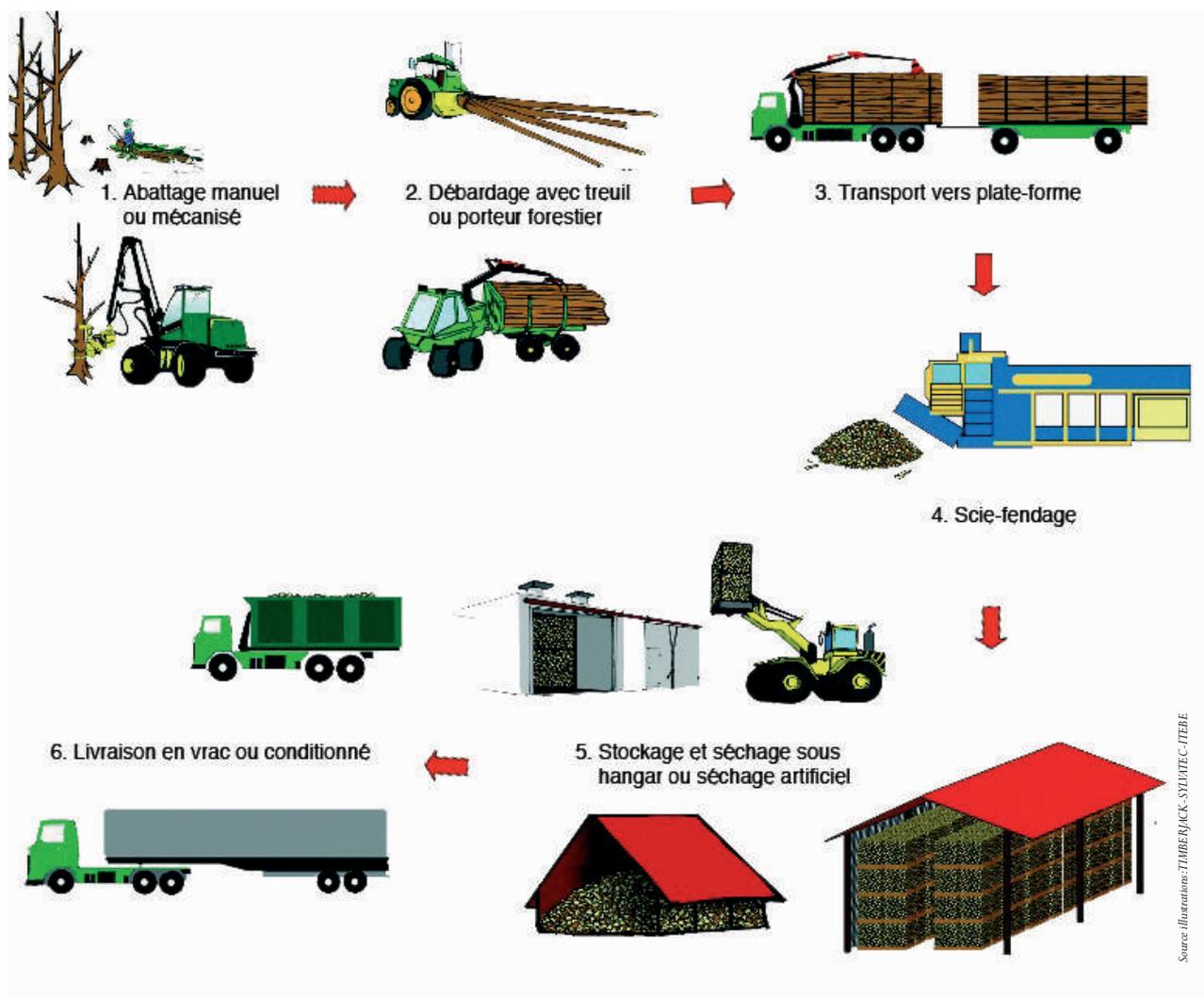


Schéma 11 : Production mécanisée de bûches sur plate-forme (cas 3)

Equipements nécessaires :

- Tronçonneuses et éventuellement abatteuse
- Tracteur forestier avec treuil ou pince à grumes, ou porteur forestier ou remorque forestière avec tracteur agricole
- Grumier ou tracteur routier et semi-remorque à plateau et ranchers avec grue à grappin

- Installation fixe de scie-fendage
- Bâtiment de séchage, voire séchoir artificiel
- Terrain de travail et de stockage.



Étapes		Opérations
1	Travaux sur la coupe	Abattage, ébranchage et débit, manuel ou mécanisé en 2, 4, 6 m ou en perches entières
2		Débardage et stockage sur place de dépôt - soit en perches avec un tracteur muni d'un treuil ou d'une pince à grumes - soit en rondins sur un porteur ou une remorque forestière
3	Transport	Transport routier jusqu'à la plate forme de stockage et de conditionnement
4	Travaux sur plate-forme	Découpe automatique en 50, 33 ou 25 cm, fendage, conditionnement en bûches avec un combiné scie-fendeuse
5		Stockage : - Empilage à la grue et stockage sur place - Livraison chez le client ou transport vers une plate forme pour séchage avant vente. Transport sur plateau
6		Séchage : - soit naturel sous hangar en casiers voire en vrac (6 mois) - soit artificiel en casiers (1 à 6 jours)
7	Livraison	- Soit en vrac ou conditionné en petits camions chez les consommateurs - Soit palettisé et livrés chez des commerçants

La production de granulés

En 2005, la production française de granulé représente 10 % de la production nationale de biocombustibles solides pour chaudières automatiques, hors industrie du bois. Cette production est assurée à 100 % à partir de sciure comme partout en Europe.

En 2006, une vingtaine d'entreprises a déclaré produire du granulé de bois, et quelques unes du granulé de paille. Seules trois de ces entreprises émanent du secteur du bois (Cogra 48, SOFAG et Savoie Pan), toutes les autres sont des organisations agricoles.

En France, le prix public généralement constaté du granulé en vrac est actuellement de 180 à 220 €TTC à la tonne livrée. Le prix du granulé en sac, souvent distribué par les revendeurs de poêles eux-mêmes, se situe entre 260 et 320 €TTC à la tonne. Le créneau actuel privilégié du granulé se situe dans les petites et moyennes installations (<500 kW), marché où les combustibles concurrents sont les plus chers.

Au vu de la liste des fabricants et des distributeurs de granulés, il est évident que le réseau de distribution est encore peu développé. Dans certaines régions en France on ne trouve aucun distribu-

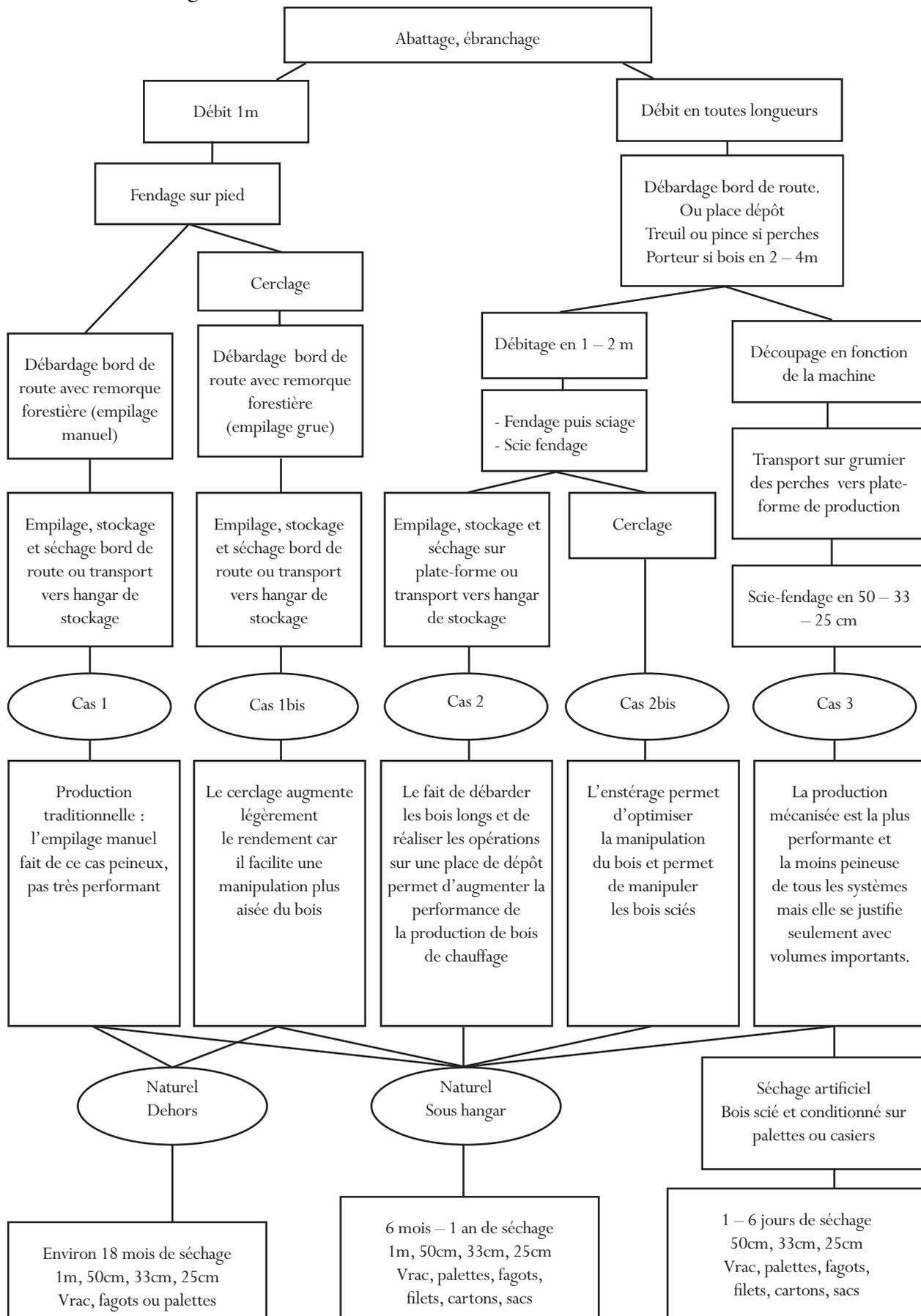
teur de granulés. Le problème se situe par rapport au manque de dépôts de granulés (stocks intermédiaires) dans chaque département, d'où les propositions faites aux distributeurs pour stocker le granulé sur place. Le coût du transport pour livrer les clients, en l'absence de dépôts régionaux ou départementaux, est plus élevé et se répercute sur le prix du granulé.



Usine de production de granulés Savoie Pan



Récapitulatif des logistiques existantes pour la production du bois de chauffage



Le conditionnement des plaquettes

Le séchage des plaquettes

De manière générale, pour des raisons économiques, il faut favoriser le séchage et stockage avant déchiquetage et transport pour ne pas avoir à pré-financer ces opérations. D'où la nécessité d'aménager les délais de sortie des produits de la coupe ou des places de dépôt.

• Le stockage à l'air libre

Le schéma le plus courant est de sortir les bois à déchiqeter de la coupe et de les empiler sur une place de dépôt, en bord de chemin voire sur une plate forme en attendant l'époque de déchiqetage. Celle-ci viendra en fin d'été pour la mise directe en silos ou avec la saison de chauffe pour les grosses chaufferies (Flux tendu).

Les bois sont débardés en 4, 6 m ou plus et placés perpendiculairement à la position future de la déchiqeteuse. Ce stockage à l'air libre permet un séchage du bois, d'autant plus rapide que les dimensions sont réduites.

Dans les régions à forte pluviométrie ou à fort enneigement, il est conseillé de recouvrir les piles d'un film protecteur sur le haut du tas seulement.

La mise en place de tas est assurée par un porteur qui dispose les rémanents en rangées haute de 3 à 4 m de hauteur maximum pour faciliter leur reprise.

Dans des cas plus rares, les plaquettes peuvent être également stockées à l'extérieur. Les petits tas (moins de 8 m de hauteur) sont à débarrasser rapidement dès le début de l'hiver afin d'en préserver la qualité. Ce stockage s'accompagne d'une perte de matière au sol et du risque d'emmener des corps étrangers avec le bois s'il est fait à même un sol non goudronné ou bétonné. Des tas plus importants peuvent rester toute la saison à l'air libre.



Photo 36: Stockage de rémanents



Photo 37: Stockage à l'air libre

• Le stockage couvert

Pour des raisons de siccité du bois ou de sécurité d'approvisionnement, il peut être nécessaire d'utiliser un bâtiment de stockage. Celui ci peut être géré par un fournisseur de combustible ou être propre à une chaufferie utilisatrice.

Le bois sec est indispensable aux chaufferies de petites tailles et tout approvisionneur de ce type de chaufferies a l'obligation technique de disposer d'un tel outil. L'opération de séchage naturel se fait sous un hangar qui doit être bien aéré mais en même temps protégé des intempéries et vents dominants. Ils doivent également être adaptés à des livraisons et des reprises de combustibles par un engin de manutention. En même temps le fournisseur peut profiter de l'opération pour calibrer certains produits afin de répondre à certains cahiers des charges.

En matière de sécurité d'approvisionnement, et pour n'importe quel taille de marché, l'approvisionneur doit disposer d'un stock de sécurité afin de palier à des périodes de perturbations : fortes intempéries, fort gel, grèves, panne de broyeur. Il est admis que 15 à 20% du volume du marché sont nécessaire pour affronter ces aléas tout en continuant à assurer la fourniture d'un produit de qualité. C'est bien souvent à ce niveau que les logistiques sont défaillantes.



Photo 38: Stockage et séchage de plaquettes sous hangar

Le transport et la livraison de plaquettes

Le transport des plaquettes du lieu de production au lieu de stockage ou de consommation se fait à l'aide de camions porte-conteneurs (2 fois 30 à 40 m³) ou de camions avec semi-remorque à fond mouvant (80 à 90 m³). Les contenances les plus volumineuses possibles sont recherchées afin de réduire les coûts de transport, la plaquette étant peu lourde v: 300 à 400 kg par m³ quand elle est fraîche.

Une autre organisation consiste à transporter le bois en perches par grumiers vers une plate forme de conditionnement et de stockage : pour les bois d'assez gros diamètres et pour des productions importantes, l'utilisation de cette logistique classique peut s'avérer la moins coûteuse.

L'alimentation des chaufferies de forte puissance se fait généralement en flux tendu : le bois n'est déchiqueté qu'avant la livraison afin d'engager les coûts le plus tard possible. Pour les petites quantités cela est différent car le bois doit souvent avoir séché pour convenir aux petites chaufferies et doit ainsi transiter quelques mois sur une plate forme de séchage (voir paragraphe suivant). La livraison en petites quantités (30 m³) se fait en conteneurs bennants ou soufflants. Les conteneurs soufflants, qui ne sont pas les mêmes que ceux pour les granulés, ne sont pas encore répandus en France, mais permettent de propulser les plaquettes à travers un tuyau jusqu'à plusieurs dizaines de mètres. Ils facilitent ainsi l'accès des camions aux silos, en particulier ceux situés en étage.



Photo 39 : Transport de plaquettes

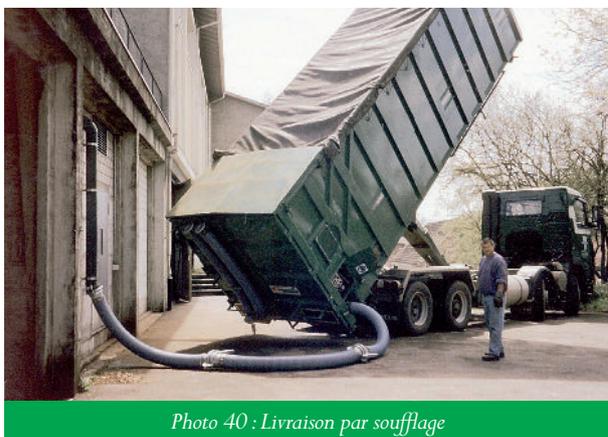


Photo 40 : Livraison par soufflage

Le conditionnement du bois de chauffage

Stockage et séchage

Lors de l'abattage des bois, la teneur en humidité est très élevée : en général 45 % hors sève et jusqu'à 65 % en sève pour le peuplier et l'épicéa. Pour répondre aux exigences de l'utilisateur qui souhaite un combustible prêt à l'emploi, il est donc nécessaire de faire abaisser cette humidité entre 20 et 30%.

Le taux d'humidité varie selon :

- **La période d'abattage** : dans l'hémisphère nord, l'abattage du bois se fait essentiellement de novembre à mars, en période de sève descendante, pour bénéficier du retrait naturel de la sève. Celui-ci réduit naturellement de 10 à 15 % le taux d'humidité du bois.
- **Le façonnage** : le fendage et le sciage en petites longueurs permettent d'accélérer la perte d'humidité. Le bois de chauffage doit être fendu en quartiers et scié le plus court possible tôt au printemps et empilé dehors. Le bois en rondins (non fendu) sèche beaucoup moins vite.
- **Le climat** : le degré d'humidité du bois diminuera plus rapidement sous des climats secs et chauds en été que sous des climats plus humides.
- **Le type de stockage** : le taux d'humidité diminuera d'autant plus vite que le bois n'est pas à l'ombre ni à la pluie. Mais le point le plus important pour le séchage c'est la ventilation. Il est donc recommandé de stocker le bois de chauffage dans un bâtiment bien venté.

Le stockage permet de garantir l'approvisionnement des clients indépendamment des contraintes saisonnières de l'exploitation forestière. Il permet également le séchage du bois qui se traduit par une nette augmentation du pouvoir calorifique du combustible, donc de sa qualité.

• Stockage et séchage en forêt ou en bord de route

Il est possible de stocker et de laisser sécher le bois dans la forêt ou en bord de route. Cela permet de limiter les coûts de stockage et de transport. Cependant, le bois laissé aux intempéries mettra beaucoup plus de temps à sécher. Il faudrait attendre 1 à 2 ans pour atteindre une humidité raisonnable pour l'utilisation. De plus, il risque de s'abîmer durant cette période : pourriture à la base du tas, insectes, soleil, ce qui vont en réduire la qualité.



Photo 41 : Fagots stockés bord de route



Si toutefois, on ne peut pas faire autrement, il faudra néanmoins le fendre en quartiers afin de faciliter le séchage. Le scier à dimensions d'utilisation réduira encore le temps de séchage. Veiller aussi à le surélever du sol à un emplacement non humide, à placer les piles au soleil et au vent et si possible à couvrir le haut des piles d'une couverture aérée.

Les quartiers peuvent être cerclés, facilitant ainsi une manipulation ultérieure plus aisée. Les vols de bois sont un problème qui arrive souvent lorsque le bois est stocké en forêt. Il faudra donc, tenir compte de ce facteur.

• Séchage naturel sous abri

Le bois de chauffage doit s'entreposer sous un toit suffisamment large pour éviter les intempéries et suffisamment haut pour les manutentions. Les bûches doivent être empilées sur un sol sec afin de prévenir le pourrissement et de réduire le développement des parasites. Si le bois est entreposé en plusieurs rangées, il faudra respecter un espace de 20 cm de largeur minimum entre chaque pile ou entre la pile et un mur pour une bonne ventilation. Les extrémités de piles doivent être adossées à des poteaux ou des parois solidement fixés pour assurer la stabilité de la structure. Le séchage de bois fendu sous abri permet de réduire de 2 à 3 fois le temps de séchage naturel. Du bois stocké selon ces règles et préalablement scié en courtes longueurs sèchera deux à trois fois plus vite que du bois en 1 mètre laissé à la pluie et empilé directement sur le sol. Après 6 à 8 mois d'été et stockées dans ces conditions les bûches peuvent être parfaitement utilisables.

Choix du site pour le stockage :

- Facteurs à tenir compte pour effectuer un bon stockage et séchage sont : avoir un relief plat, pour que les bûches soient stables
- Avoir une exposition au vent maximale. Le vent est le principal agent sécheur
- Avoir un bon accès routier

• Séchage artificiel

Une autre façon de sécher le bois est le séchage artificiel. Il existe différentes méthodes de séchage artificiel, tels que le séchage à air froid (ventilateur), à air chaud ou à vapeur d'eau.

Mais les cellules de séchage sont encore très chères pour le marché du bois de chauffage, et bien peu de professionnels peuvent envisager de tels investissements. Il en existe pourtant plusieurs exemples en Europe. Le séchage artificiel permet de réduire considérablement le temps de séchage, il est adapté aux conditionnements obligatoirement très secs des bois vendus en magasins. La raison principale de l'utilisation de ce système est la vitesse de séchage, celle-ci étant largement inférieure à celle du séchage traditionnel. Nous pouvons obtenir du bois parfaitement sec avec des temps du séchage de 24h à 4 jours. Ceci a les gros avantages de limiter fortement les frais de stockage si l'on veut faire du bois vraiment sec.

Les conditionnements du bois de chauffage

Comme pour tout produit, le conditionnement répond de plus en plus aux demandes pratiques des consommateurs. Plus il est sophistiqué, plus il est onéreux. Il est indispensable de le prévoir

le plus tôt possible dans la chaîne de production afin de réduire ces coûts.

Le bois de chauffage est vendu sous différents volumes :

• En stères rangés

Les stères de bois de chauffage sont vendus sous la forme de piles de bûches rangés, soit en forêt, soit en bordure de route, soit sur le camion de livraison.

• En fagots

Les fagots de bois de chauffage sont des ensembles de bûches, rassemblées par des cordages ou des sangles grâce à un gabarit. Ce conditionnement permet de : mesurer facilement la livraison, livrer sur palette, faire la recoupe en 50, 33 ou 25 à la livraison, faciliter la manipulation des stères pour le client.

• En palettes

Les palettes de bois de chauffage sont des ensembles de bûches, maintenus sur une palette, par des cordages, des sangles, une armature en bois ou en fer, ou éventuellement filmé avec un plastique.

• En vrac

Le bois en vrac est livré par bennage, sans rangement particulier. Généralement pour les courtes longueurs

• En filets, en sacs ou en cartons

En principe pour la grande distribution ou les stations services, les sacs de petite capacité contiennent des bûches généralement de courtes longueurs (25 à 33 cm) ou du petit bois d'allumage.



Photo 42 : Stères, bord de route



Photo 43 : Palettes de bûches



Transport et livraison de bois de chauffage

C'est la dernière étape de l'approvisionnement. Le transport peut s'effectuer de différentes manières. Les plus courantes sont par camion porteur avec une benne, par porteur + remorque, si la quantité est plus importante, et par semi-remorque. Les coûts de transport sont le plus souvent onéreux, surtout si les bûches sont en vrac, en raison de sa faible densité. Le choix du mode de transport des produits avant ou après leur préparation, doit se faire en considérant le minimum de manutention à générer et le maximum de praticité pour le client.



Photo 44: Petits camions de livraison

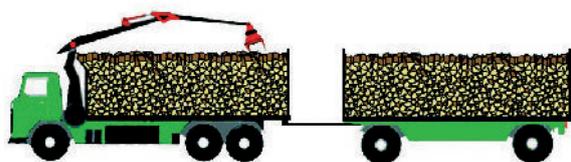


Schéma 12 : Porteur routier + remorque



Photo 45 : Porteurs routiers

Conditionnement du granulé

Les granulés sont conditionnés en sac de 15 ou 20 kg, en big bag de 1 tonne ou en vrac.

• En sac :

Le particulier qui dispose d'un poêle, d'une cheminée, ou d'un insert, peut acheter ses granulés par sacs de 15 ou 20 Kg ou par big bag de 1 tonne.

• En vrac :

C'est le mode de livraison pour les chaudières à granulé. L'alimentation du silo est effectué soit par semi à fonds mouvant, soit par camion citerne équipé d'une soufflerie. Ce mode de livraison est également utilisé chez le particulier et n'est pas plus contraignant qu'une livraison de fioul.

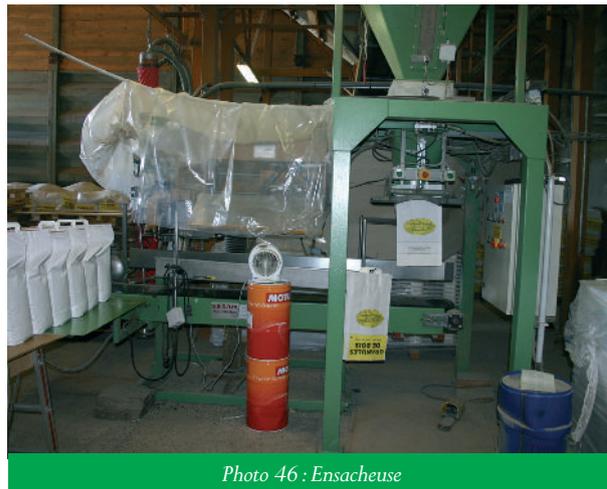


Photo 46 : Ensacheuse



Photo 47 : Bigs bags



Photo 48 : Palette de sacs de 15kg de granulés



UTILISATION DU BOIS COMME SOURCE D'ÉNERGIE

Les principes physiques de la combustion

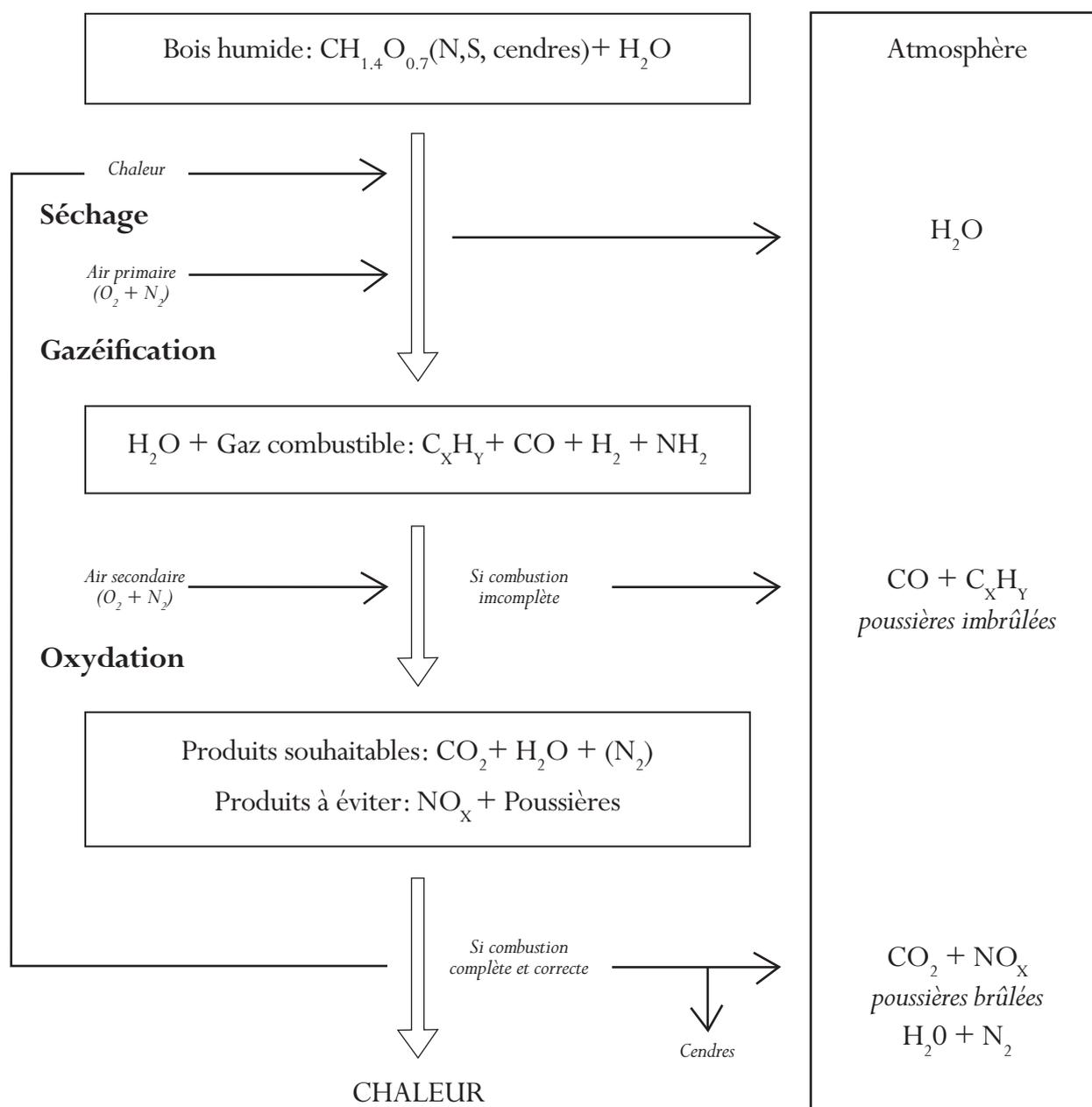
Pour que la combustion soit possible, il faut réunir en même temps une matière combustible, un corps comburant (oxygène, air...) qui, en se combinant, produisent la combustion et une énergie pour le démarrage de la réaction chimique de combustion.

La conversion thermo-chimique est adaptée aux caractéristiques du bois. Elle permet de valoriser tout les composants du bois et utilise une matière première sèche.

Les utilisations de la biomasse comme combustible s'inscrit dans le cycle naturel du carbone :



Schéma 13 : Processus de la combustion du bois [Thomas Nussbaumer, Jürgen Good, Verenum]



La combustion directe

Au cours de la combustion directe, le bois est décomposé par la chaleur dans le foyer en gaz (80 à 90 %) et en charbon de bois. Les gaz combustibles issus du bois sont le monoxyde de carbone (CO), l'hydrogène (H₂) et les hydrocarbures (C_mH_n). Ces gaz doivent être brûlés dans la chambre de combustion, sans quoi ils pollueraient l'atmosphère et le rendement serait affaibli. Le but de la combustion est donc de convertir au maximum l'énergie chimique du bois en chaleur, par oxydation.

Les cendres sont les résidus incombustibles solides constituées de matières minérales composées principalement de chaux, de potasse, d'acide phosphorique, de silice et de magnésie. La quantité des cendres est variable suivant l'essence, la qualité de la combustion et aussi la propreté du combustible.

La gazéification

La gazéification du bois est le procédé qui permet la transformation du bois en gaz combustible, composé essentiellement de monoxyde de carbone, d'hydrogène et de nitrogène mélangés à des goudrons et des cendres volantes. La gazéification du bois est obtenue en présence d'un mélange de vapeur et d'oxygène.

Les procédés traditionnels de gazéification à l'air, à faible température et faible pression, produisent du gaz pauvre. Ce gaz est composé d'un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène, et près de 50 % d'azote et de gaz carbonique qui sont incombustibles. Malgré le faible pouvoir calorifique de ce gaz, ce procédé permet de valoriser des déchets bois en alimentant en gaz un moteur pour produire de l'électricité.

Les procédés modernes de gazéification à l'oxygène à haute température et à haute pression et une épuration du gaz produisent un gaz de meilleure qualité. Des centrales électriques de plusieurs dizaines de mégawatts pourront ainsi être alimentées en gaz par des installations de grandes tailles quand les tarifs de l'électricité le permettront.

Pour la production d'électricité, les avantages de la gazéification sur la combustion directe résident dans une plus grande propreté de la combustion (absence de cendres et de goudrons) et la possibilité d'obtenir des rendements plus élevés du fait de températures de combustion plus hautes et de la valorisation de l'énergie contenue dans les gaz d'échappement de la turbine à gaz, dans la production de vapeur.

La production de vapeur est utilisable pour des procédés industriels : soit pour être injecté dans la chambre de combustion (centrales à gazéification de biomasse intégrée et à injection de vapeur), soit pour détendre la vapeur dans une turbine à vapeur entraînant un alternateur (centrales à gazéification de biomasse intégrée et à cycles combinés). Ces centrales sont actuellement encore des projets pilotes de recherche et développement.

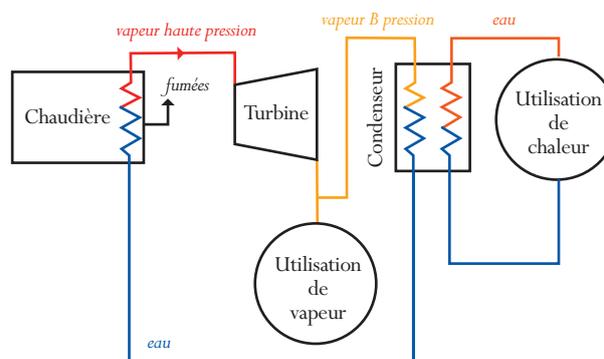
La cogénération à partir de bois

La cogénération consiste à produire simultanément de la chaleur et de l'électricité. Elle s'est beaucoup développée dans les pays scandinaves et germanophones. Compte tenu des coûts d'investissements importants, seuls les projets de puissance élevée sont actuellement rentables. Plusieurs technologies sont utilisées pour faire de la cogénération à partir de bois :

• Cogénération avec une chaudière et turbine à vapeur :

La cogénération avec turbine vapeur est la plus classique et celle que l'on voit le plus souvent dans les installations. La technologie vapeur est identique aux autres installations avec turbine vapeur, quelle que soit l'énergie utilisée. La différence technologique s'arrête au niveau de la chaudière. Cette technologie est onéreuse et n'est envisageable qu'à partir de puissance électrique installée supérieure à 100 kW.

Schéma 14 : Cogénération par filière combustion / turbine à vapeur



• Cogénération avec une chaudière et moteur à vapeur :

La cogénération avec moteur à vapeur est la plus ancienne des technologies. Née au XIX^{ème} siècle, le moteur vapeur avait été abandonné au profit des turbines et des moteurs à combustible interne. Cependant quelques sociétés ont re-découvert les intérêts de ces systèmes et ont développé de nouveaux moteurs adaptés à la cogénération à bois.

• Cogénération à Cycle Organique de Ranjine (ORC) :

Le combustible bois est brûlé dans une chaudière qui élève la température de l'huile thermique à 300°C. L'huile thermique est envoyée dans un turbogénérateur basé sur le cycle thermodynamique de Rankine. Le turbogénérateur produit de l'électricité et génère de la chaleur sous forme d'eau chaude d'une température de sortie variant entre 80°C et 90°C. L'eau chaude est utilisée dans des installations de chauffage ou pour le séchage du bois.



Exemple de l'installation de Bière en Suisse :
deux chaudières bois, une de 1 800 kW à l'huile thermique destinée à la cogénération et une de 1 400kW à l'eau chaude. Le turbogénérateur ORC relié à la chaudière à l'huile thermique

produit au minimum 300 kWél et 1440 kWth. Cette installation comporte aussi deux accumulateurs de chaleur d'une contenance unitaire de 45 m³.

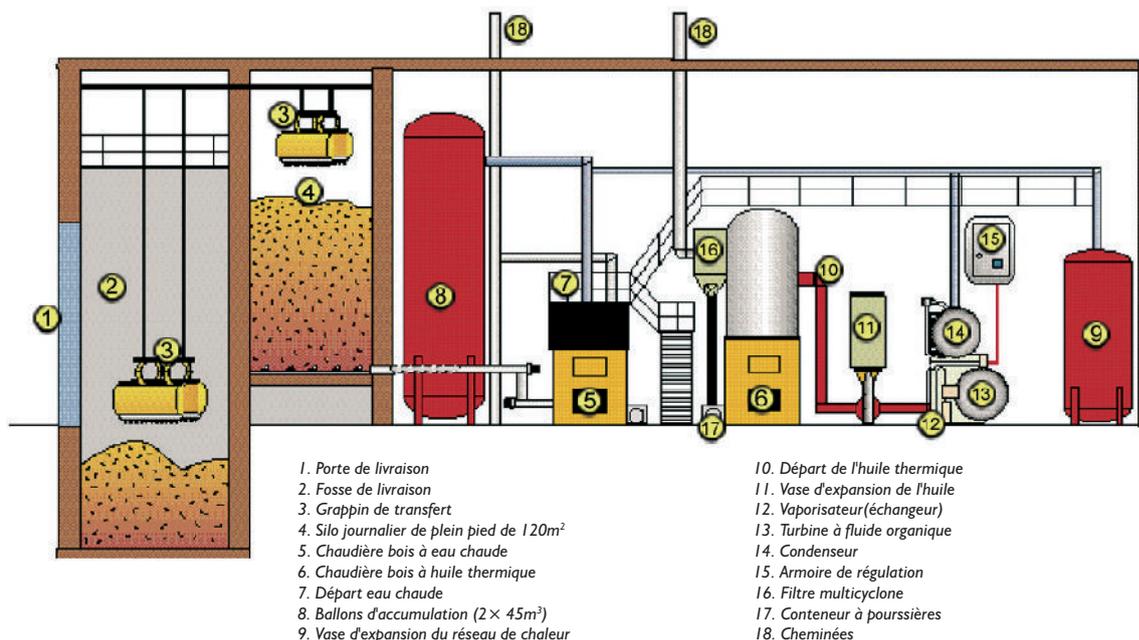


Schéma 15 : Principe de l'installation (source ITEBE)

La pyrolyse

La pyrolyse du bois est le procédé qui permet la transformation du bois en gaz combustible, produits condensables (eau et goudrons) et du charbon de bois. Elle correspond à la décomposition thermique du bois, sous vide ou en présence de gaz inerte.

Les procédés traditionnels de pyrolyse utilisent des températures de 300 à 600 °C et produisent du charbon de bois. Ce charbon de bois est intéressant par sa faible densité et son PCI élevé, mais il ne contient que 30 à 50 % de l'énergie initiale du bois car le reste est perdu dans des produits volatils lors de la carbonisation.

Les procédés modernes de pyrolyse utilisent des températures

plus élevées et récupèrent l'énergie des produits volatils. Ils mènent à la production de produits liquides qui, du fait de leur acidité, doivent être traités avant d'être utilisés comme combustibles éventuels.

Enfin, la pyrolyse rapide à haute température (de 800 à 900 °C) permet de transformer 10 % de l'énergie contenue dans le bois utilisé en combustible solide et 60 % en combustible gazeux de bonne qualité (gaz de synthèse riche en hydrogène et en monoxyde de carbone [CO]). Techniquement, il serait possible de transformer ce gaz de synthèse en méthane ou en méthanol (utilisable comme carburant), mais actuellement ce n'est pas envisageable économiquement.

Les applications

Les applications dans le secteur domestique

On peut définir les besoins de l'utilisateur pour un appareil de chauffage au bois parmi les points suivants :

- Confort d'utilisation
- Implantation (encombrement minimum, stockage facile, propreté d'alimentation et entretien limité)
- Confort de l'énergie rendue (régulation de la combustion et des distribution de la chaleur souhaité)
- Esthétique, ambiance (« feu de bois »)
- Investissement raisonnable

- Coûts de fonctionnement concurrentiels
- Sécurité
- Services après vente local
- Impact positif pour l'environnement

• **Le chauffage de l'habitat individuel** peut être assuré par de nombreuses technologies comme les poêles, cheminées, chaudières utilisant une vaste gamme de bio-combustibles, tels que les bûches, briquettes, granulés, voire des plaquettes forestières.



On peut définir des besoins en énergie à titre indicatif :

Tableau 16 : Besoins d'énergie

Besoins	Puissances de chauffage en kW	Consommation de bois en stère par an
Une pièce principale	5	3 à 5
Maison individuelle, bien isolée	8 à 15	7 à 15
Maison individuelle faiblement isolée	20 à 25	20 à 25
Grande maison individuelle	25 à 45	25 à 35

• **Les réseaux de chaleur** peuvent être présents dans des villages ou des petites entreprises (puissances de 100 kW à 5 MW) ainsi que dans la grande industrie ou les villes et alimenter tout ou partie de celles-ci (puissances de 5 à 500 MW).

Ils sont composés de 3 éléments principaux :

- la centrale de production de chaleur : elle peut être réalisée en une ou plusieurs unités de production.
- Les consommateurs : industries, bâtiments communaux, magasins, hôpitaux, écoles, bureaux ou locaux d'habitation collective.
- Entre les deux, un circuit de conduites de chauffage permet de véhiculer la chaleur.

Les réseaux de chaleur apportent de nombreux avantages, ils permettent de mutualiser les investissements des utilisateurs, d'exploiter la chaufferie par un professionnel et ainsi avoir un meilleur suivi technique et de se diversifier au niveau des ressources énergétiques.

• **Les bains-douches, hammams et piscines** : Le recours à la biomasse pour le chauffage d'eau à vocation hygiénique ou de loisir est particulièrement intéressant car ce sont des utilisations très consommatrices sur des durées importantes. Le recours à un combustible local et bon marché est gage d'intérêt économique local et donc de pérennité.

• **La cuisson** : Le bois-énergie est largement utilisé dans le monde pour la cuisson domestique des aliments, notamment dans les pays les moins développés. Dans les pays développés il existe des technologies adaptées à la vie moderne.

• **La production d'eau chaude sanitaire** : La production d'eau chaude sanitaire dans les établissements gros consommateurs et réguliers est particulièrement intéressante du fait du faible coût du combustible. Ceci peut concerner les hôpitaux, les maisons de retraite, certaines industries agroalimentaires ainsi que tous les réseaux de chauffage urbain au moins durant la saison de chauffe.

Les applications dans le secteur agricole

L'application la plus répandue dans le secteur agricole est le chauffage de l'habitation des exploitants (voir études de cas) et de gîtes touristiques.

On rencontre un nombre grandissant de projets bois énergie faisant intervenir des agriculteurs (voir études de cas). La plupart du temps les exploitants agricoles se positionnent en tant que fournisseurs de combustible dans le cadre de CUMA ou de GIE. Ces projets sont généralement des projets collectifs faisant intervenir des acteurs comme les communes voulant créer un réseau de chaleur ou les parcs naturels qui souhaitent développer une thématique énergie renouvelable.

Ces projets sont importants pour la filière bois énergie car ils permettent d'initier le développement de la filière. En effet, ils structurent l'offre bois énergie en participant à la création d'un réseau d'approvisionnement en bois énergie grâce à la création d'une filière agricole. Ils peuvent être le déclencheur indispensable à l'essor de ce marché.

Plus rares sont les projets où il y a une exploitation par les agriculteurs, du combustible bois pour produire de l'énergie (le plus souvent sous forme de chaleur) dans le cadre d'une production agricole. On peut voir des applications du type production d'eau chaude utilisée pour l'alimentation dans les élevages hors sol, chauffage de locaux d'élevage, séchage de foin, de plantes aromatiques, de noix, diversification type fabrication de confitures ou fromagerie, chauffage de serres...

Dans le cas des serres la chaleur produite à partir de la biomasse peut être utilisée pour réguler la température. La proximité d'une ressource biomasse facilite souvent ce recours. Cependant l'intérêt réside surtout au niveau économique du combustible biomasse car ces installations sont très consommatrices.

Un autre intérêt est la fertilisation carbonique : L'augmentation de teneur en CO₂ de l'air a un effet positif sur la production végétale. Des apports de CO₂ en serre «fertilisation carbonique» montrent que cette augmentation favorise la photosynthèse et la production de biomasse végétale.

Les applications industrielles

• **La cuisson industrielle** : Les procédés thermiques à sec, c'est à dire l'utilisation de l'air chaud directement à la sortie du foyer, sont utilisés pour la cuisson des céramiques, des tuiles ou des briques, mais également pour la cuisson des aliments en boulangerie ou restauration.



• **La torréfaction :** Principalement dans les pays en voie de développement, la biomasse est utilisée dans l'industrie agro-alimentaire pour la torréfaction du café ou du cacao. Certaines sociétés proposent des torréfacteurs fonctionnant à la biomasse permettant de faire une torréfaction beaucoup plus douce avec des coûts réduits et qui produit des saveurs de très grande qualité.

• **Le traitement ou le séchage du bois :** Le traitement des bois peut nécessiter la production d'eau chaude (étuvage, séchage), le chauffage de produits (vernis) ou la production de vapeur (injection, séchage, cintrage, pressage). L'abondance de la ressource des sous-produits biomasse dans l'industrie du bois invite les professionnels à valoriser cette ressource en priorité.

• **Le froid par machine à absorption :** A partir d'une centrale à la biomasse, il est possible d'installer des machines frigorifiques à absorption. Ces machines, utilisant de la chaleur pour faire du froid, sont intéressantes pour une puissance «froid» allant de 300 kW à plusieurs milliers de kW. Cela concerne donc des immeubles administratifs conséquents, un hôpital, des laboratoires de chimie, etc.

• **Le nettoyage à sec :** Le nettoyage industriel par vapeur est fortement consommateur d'énergie. Activité régulière, elle constitue une application adaptée pour la chaleur produite par la biomasse. Elle peut de plus être judicieusement combinée dans les établissements hospitaliers ou certaines industries en complément du chauffage de l'eau chaude sanitaire.

• **La production d'électricité avec cogénération :**

La cogénération est la production combinée de chaleur et électricité. Les rendements de production électrique à partir de biomasse sont faibles (15 à 25 % en procédés vapeur), ce qui fait que tout le reste est constitué de chaleur. Pour une bonne efficacité énergétique, il faut donc rechercher au maximum une valorisation de la chaleur connexe à la production d'électricité, ce qui peut atteindre une efficacité énergétique supérieure à 90%. Il existent des différentes voies technologiques de production d'électricité à partir de chaleur (voir partie la cogénération à partir de bois).

• **L'évaporation et le séchage :** L'évaporation de l'eau est avec la cuisson et la sidérurgie l'un des plus anciennes applications de la chaleur de la biomasse, par exemple l'évaporation des saumures dès l'antiquité pour la fabrication du sel. Aujourd'hui beaucoup de liquides sont à sécher dans l'industrie agroalimentaire par exemple le lactosérum, le sirop de canne, les boues d'épuration, les déjections, etc. Le séchage de produits agricoles, fruits, céréales ou pour la granulation par exemple (luzerne, tourteaux, marcs...), est également une application énergétique judicieuse des biomasses résiduelles de l'agriculture ou de la forêt.

• **Les entraînements mécaniques :** La chaleur sous forme de vapeur est utilisée depuis deux siècles pour l'entraînement des machines dans l'industrie. Cet usage perdure dans les secteurs du globe où la biomasse est abondante, et où l'accès aux combustibles fossiles ou à l'électricité est trop onéreux.

Les Technologies (particulier, industriel, collectivité)

Introduction

Depuis la fin du XX^{ème} siècle et en ce début de ce XXI^{ème} siècle, l'utilisation du bois comme source d'énergie s'est diversifiée pour recouvrir maintenant quatre grands types d'usages au même titre que les autres sources d'énergie. Il s'agit des procédés thermiques, du chauffage des locaux, de la production d'électricité et de la production de carburants et de combustibles liquides.

La gamme des technologies actuelles pour le bois-énergie offre une grande diversité de choix. Des solutions adaptées aux besoins modernes (propre, respectueux de l'environnement, agréable, souple et facile d'utilisation, économique) couvrant tous les besoins en chaleur et en eau chaude sanitaire, grâce aux innovations technologiques (la régulation de la puissance et un rendement élevé par exemple) et au design.

On distingue 5 gammes différentes en matière d'équipements bois-énergie disponibles sur le marché :

- **Les matériels d'agrément** (combustible bûche bois massif ou charbon de bois)
 - Les barbecues
 - Les cheminées à foyer ouvert (âtres)

- Les inserts et cheminées à foyer fermé bas de gamme ou « artistiques » (convecteur sans inertie)
- Les petits poêles à convection (convecteur sans inertie)

• **Les appareils de chauffage d'appoint** (8 à 15 kW, bûches massives ou reconstituées et granulés de bois)

- Les poêles à bûches avec gestion d'air primaire (convecteur à inertie moyenne)
- Les poêles à bûches à combustion améliorée : air secondaire, chambre de post combustion, catalyseurs (convecteurs à nergie moyenne)
- Les poeles à granulés (distributions par air pulsé et régulation poussée)
- Les cheminées avec récupération d'air chaud (convection et air pulsé)
- Les cuisinières (convection à inertie moyenne, voire distribution par eau chaude)

• **Les installations de chauffage principal au bois** (8 à 70kW, combustibles bûches massives ou reconstituées, granulés de bois, plaquettes voir sciure ou copeaux)

- Les poêles à accumulation (distribution par rayonnement et régulation par tirage naturel)
- Les chaudières à bûches à combustion montante (tirage naturel et distribution par eau chaude)



- Les chaudières à bûches à bûches à tirage forcé (régulation paramétrée et distribution par eau chaude)
- Les chaudières à bûches à bûches avec accumulation en ballon d'eau chaude (distribution par eau chaude)
- Les chaudières automatiques aux granulés de bois (les compactes et les intégrées au bâtiment)
- Les chaudières automatiques aux plaquettes (pour les grosses consommations)
- Les réseaux de chaleur (raccordement eau chaude en sous-station)

• **Les installations de production d'électricité à partir de bois**

• **Les installations de production de carburant et combustibles liquides**

Nous ne traiterons dans cette exposé que les appareils de chauffage utilisant les combustibles bois issus potentiellement d'une production agricole, c'est à dire consommant des plaquettes forestières, des bûches ou des granulés de bois.

Les appareils

Les cheminées à foyer ouvert ou les âtres

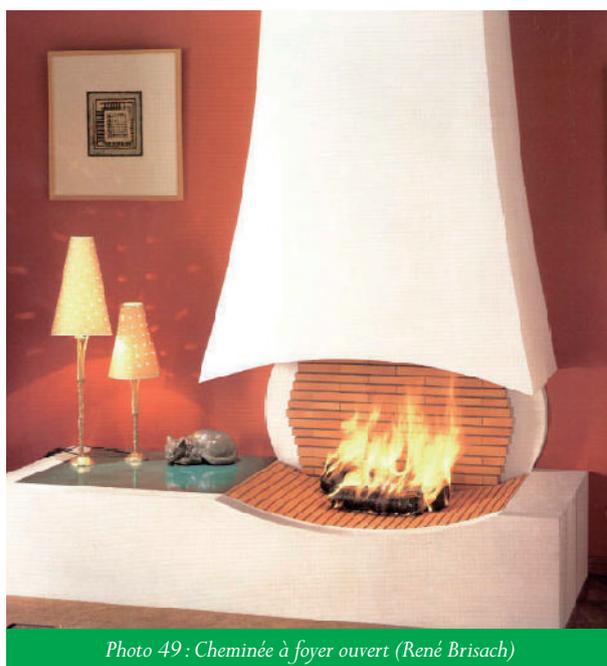


Photo 49 : Cheminée à foyer ouvert (René Brisach)

Les cheminées à foyer ouvert ont un usage principalement d'agrément. Il en existe de différents styles : classiques, modernes ou rustiques. Elles peuvent être semi-encastrées, adossées, en épi, totalement encastrées ou même centrales. L'emplacement à choisir est la pièce de vie : salle à manger ou la cuisine si l'on y mange.

D'un point de vue énergétique le rendement des âtres sont faibles (<10%) et ils consomment ainsi beaucoup de bois. S'ils sont bien conçus ils peuvent néanmoins réchauffer une pièce durant

quelques heures, pour le plus grand bonheur des occupants, mais l'autonomie reste faible.

Il n'est pas possible de régler l'air de la combustion sur une cheminée. Elle ne peut pas être considérée comme un chauffage. Les 300 à 500 m³ d'air préchauffé qui quitte la pièce par la cheminée sont remplacés par de l'air extérieur frais. Sauf si une arrivée d'air extérieur est prévue pour la combustion.

• **Caractéristiques :**

Rendement de 0 à 30%

Combustible : bûches, briquettes

Autonomie : 1 à 3 heures

Alimentation : manuelle

L'investissement d'une cheminée est généralement compris entre 1 000 € et 8 000 €.

Une attention toute particulière sera apportée dans le cas du choix d'une cheminée ouverte :

- Faire réaliser un conduit de fumée qui garantisse un tirage par tous temps, sinon la cheminée ouverte sera inutilisable,
- Faire poser un clapet pour fermer le conduit de fumée quand on ne s'en sert pas pour éviter de siphonner la chaleur de la pièce vers l'extérieur en permanence,
- Placer un sol et des éléments non combustibles à trois mètres à la ronde.

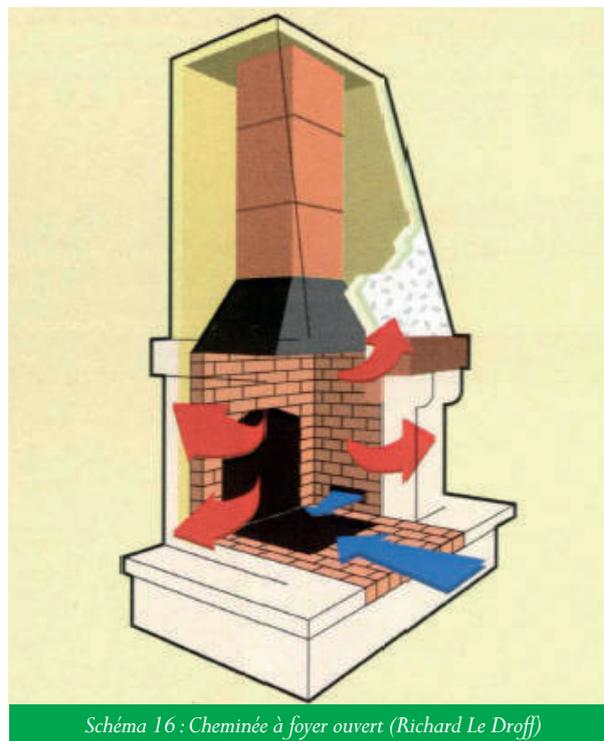


Schéma 16 : Cheminée à foyer ouvert (Richard Le Droff)

• **Les éléments d'une cheminée :**

-Le foyer est constitué d'une dalle réfractaire horizontale sur laquelle a lieu la combustion. Elle peut comporter une grille centrale au-dessus d'un cendrier.

- La mise en place d'une plaque en fonte de fond permet de faire mieux rayonner la chaleur.



- L'avaloir est la partie en forme de pyramide tronquée qui coiffe le foyer et le raccorde au conduit.
- La hotte est l'habillage destiné à dissimuler l'avaloir et le départ du conduit.
- La poutre ou le linteau est généralement une pièce de bois ou de pierre, n'existe pas sur la plupart des cheminées modernes
- Le corbeau est une pièce parfois encastrée dans le mur. Elle est destinée à soutenir le linteau.
- Le jambage délimite les cotés de l'ouverture de la cheminée et sert de soutien au linteau.
- Le socle est destiné à protéger le plancher.
- Une prise d'air extérieur améliore l'efficacité générale.

• Les bouilleurs d'âtres

Le foyer ouvert peut éventuellement être équipé d'un récupérateur de chaleur à eau qui alimentent quelques radiateurs. Ces installations ne sont pas anodines et doivent respecter les normes d'installation des chaudières de chauffage central.

Les inserts et foyers fermés



Photo 50 : Cheminée à foyer fermé

Les foyers fermés s'installent sous un conduit de fumée et sont habillés par une cheminée décorative. L'air de la pièce se réchauffe par rayonnement de la vitre et par convection grâce aux ouvertures ménagées dans la hotte. Certains possèdent une ventilation qui pulse l'air chaud récupéré autour du foyer dans la pièce. Un dispositif de récupération de l'air chaud de la hotte peut également permettre de chauffer d'autres pièces. Enfin, certains nouveaux modèles sont équipés d'un foyer à post-combustion améliorant l'efficacité. De manière générale les performances

de chauffage des foyers fermés sont très nettement supérieures à celles des cheminées ouvertes. Le rendement est généralement de 30 à 60 % et la puissance des foyers est environ de 10-15 kW.

• Les inserts

Pour installer un insert, il faut déjà disposer d'une cheminée ouverte. Les inserts sont à choisir en fonction de l'ouverture et de la disposition de la cheminée. Ils se présentent sous la forme d'une caisse en plaques de fonte encastrable et équipée d'une porte vitrée. Ils possèdent une admission d'air de combustion avec réglage. Ce matériel qui ne peut chauffer qu'une pièce sert à améliorer le rendement de la cheminée. Les inserts ne fonctionnent qu'avec la porte fermée.

• Installation et entretien

Deux ramonages mécaniques sont à effectuer par an. Il faudra alors contrôler le raccordement et le conduit de cheminée pour s'assurer du bon état de l'ensemble. Pour éviter les sinistres, il est préférable de faire réaliser les opérations d'installation et d'entretien par un professionnel.

• Les récupérateurs à air et les cheminées-chaudières

Sur un foyer de cheminée, il est possible d'installer un récupérateur de chaleur à air ou à eau afin d'augmenter le rendement de l'appareil et de chauffer d'autres pièces.

Les récupérateurs de chaleur à air puisent la chaleur dans la hotte, autour du foyer ou dans un caisson spécial au contact des flammes. L'air est ensuite diffusé dans la maison comme le montre le schéma ci-dessous.

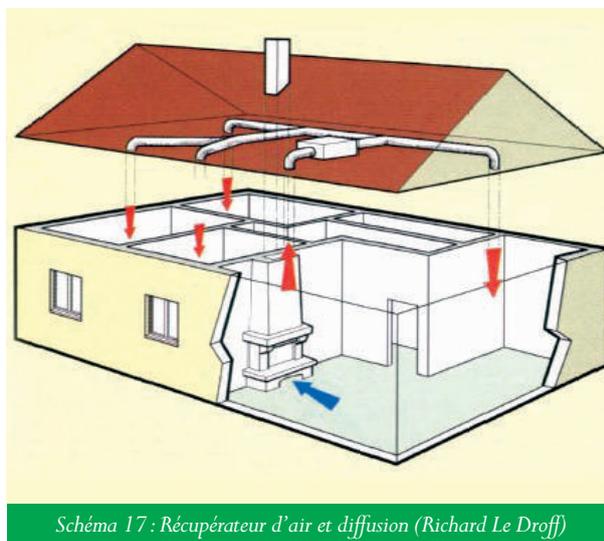


Schéma 17 : Récupérateur d'air et diffusion (Richard Le Droff)

La cheminée-chaudière, (schéma 20) possède un échangeur positionné dans la cheminée et alimentant des radiateurs. Comme les bouilleurs d'âtres ce sont des installations de chauffage central.

• Caractéristiques:

- Rendement de 30 à plus de 70 %
- Gamme de puissance de 8 à 30 kW
- Combustible : bûches, briquettes
- Autonomie : 3 à 6 heures
- Alimentation : manuelle



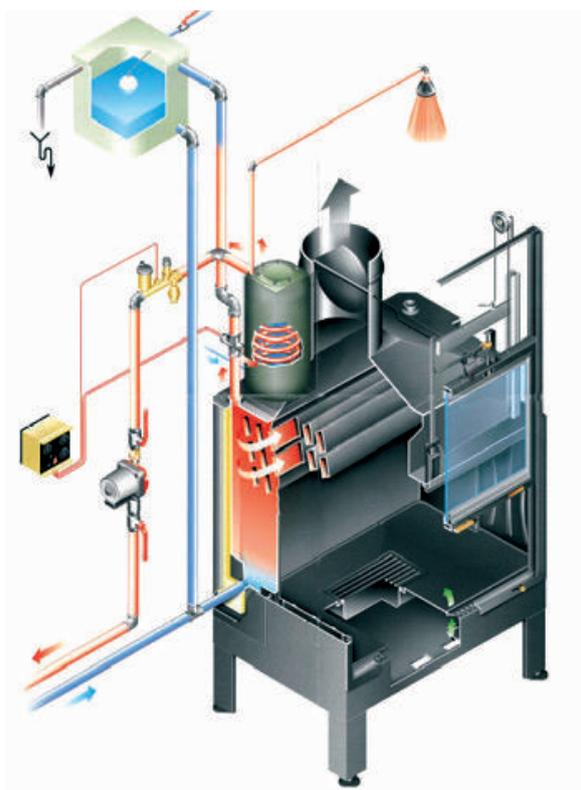


Schéma 18 : Cheminée-chaudière (Palazzetti)

L'investissement d'une cheminée est généralement compris entre 2000 et 8000 €.

• Principe de fonctionnement :

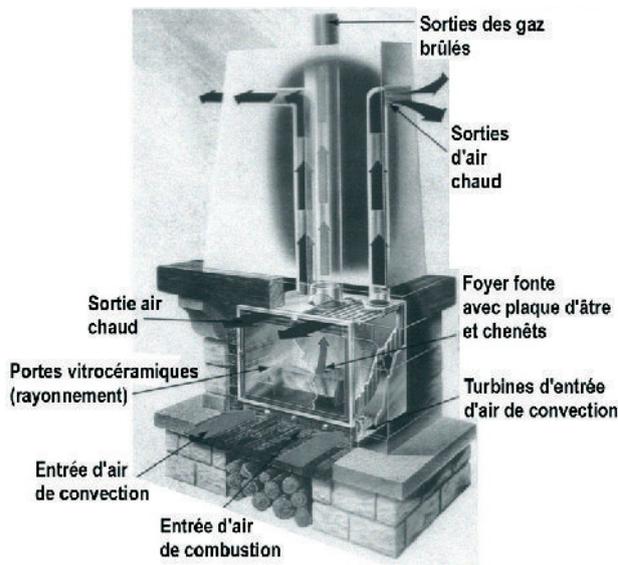


Schéma 19 : Principe de fonctionnement

Les petits poêles à bûches

Le poêle, appareil de chauffage autonome, convient normalement au chauffage direct d'une pièce. Cependant, grâce à l'évolution de l'isolation des habitats modernes et avec un choix

judicieux de son emplacement, le poêle peut suffire en tant que chauffage de base, à condition de respecter deux notions :

- il doit être placé dans la pièce la plus fréquentée,
- la chaleur doit pouvoir circuler librement entre les différents espaces de vie.

• Les poêles traditionnels



Photo 51 : Poêle traditionnel (Palazzetti)

Le poêle traditionnel est issu d'une tradition industrielle très ancienne notamment celle des fonderies. Ces poêles chauffent bien, mais souvent de conception simple ils sont donc gourmands en bois. Ils constituent la part de marché la plus importante car ils sont d'un prix très abordable. Ils sont composés d'une chambre de combustion en acier ou en fonte et diffusent la chaleur par convection et rayonnement.

Généralement leur inertie est faible et fonctionne mal au ralenti, leur autonomie est limitée à environ 5 heures. Ce sont les appareils de chauffage au bois les plus faciles à installer.

Il en existe une infinité de formes, de couleurs, de tailles et de styles. Les modèles récents disposent d'une régulation des entrées d'air, ce qui améliore le confort et l'autonomie. Certains même disposent d'une chambre de post-combustion qui améliore sensiblement leur rendement et limite les tâches d'entretien.

• Les poêles cheminée

Les poêles-cheminée, aussi appelés poêles scandinaves, sont de conception peu différente de celle des précédents. Par contre, ils sont munis d'une grande vitre, parfois d'un chauffe-plats, et ont développé une esthétique très moderne et variée, ce qui les place aussi en bonne position dans les ventes malgré leur prix plus élevé.

• Utilisation et entretien

L'entretien des poêles est très simple : comme les cheminées, ce sont des appareils qu'il faut décrocher après chaque jour d'utilisation. Deux ramonages mécaniques sont à effectuer par an dont un pendant la saison de chauffe. Il faudra alors contrôler le raccordement et le conduit de cheminée pour assurer du bon état de l'ensemble. C'est le non contrôle régulier du conduit qui peut provoquer les accidents.





Photo 52 : Poêle cheminée

• Les poêles modernes

Les poêles de conception moderne sont soit des poêles en acier/ fonte avec rendement élevé mais avec une inertie thermique limitée, soit des poêles de forme classique (fonte et matériaux réfractaires) avec un rendement élevé, des émissions faibles, une autonomie importante et une forte inertie thermique.

Les poêles à bûches avec une gestion de l'air primaire sont des appareils d'appoint à inertie moyenne, ils ont une combustion plus propre et un meilleur rendement.

Les poêles à bûches à combustion améliorée sont des appareils d'appoint. Ils sont équipés d'une double arrivée d'air, d'une chambre de post-combustion et ont une inertie moyenne.

Certains constructeurs de poêles ont fait d'énormes efforts sur le plant de l'esthétique et de la performance. Ils sont par exemple couverts de céramique.

Les poêles équipés d'un bouilleur peuvent alimenter un ballon d'eau chaude et plusieurs radiateurs. Le rendement des poêles varie de 40 à 70 % et leur puissance de 4 à 16 kW. Dans la plupart des cas la combustion est montante.

• Caractéristiques :

Poêles classiques	Poêles performants
Rendement de 40 à 70 %	Rendement de 60 à 80 %
Gamme de puissance en 5 à 20 kW	Gamme de puissance en 5 à 20 kW
Combustible : bûches, briquettes	Combustible : bûches, briquettes
Autonomie : 3 à 6 h	Autonomie : 5 à 10 h
Alimentation : manuel	Alimentation : manuel

L'investissement est généralement compris entre 650€ et 3500€ pour les petits poêles et de 650 à 3500 € pour les poêles performants.

Les poêles à accumulation

Les poêles à accumulation, poêles masses ou poêles faïences sont des installations de chauffage principal au bois. Ils reposent sur le principe de l'accumulation de chaleur et du rayonnement.



Schéma 20 : Poêle à accumulation (Tulikivi)



La régulation est faite par réglage manuel et avec un tirage naturel. Ils pèsent très lourd, souvent plus d'une tonne et sont souvent construits sur place.

Certains de ces poêles sont maçonnés directement dans la maison permettant une meilleure diffusion et stockage de la chaleur. Ces appareils sont composés avec des matériaux ayant une forte inertie comme les briques réfractaires revêtues de carreaux de faïence ou de roches (stéatite).

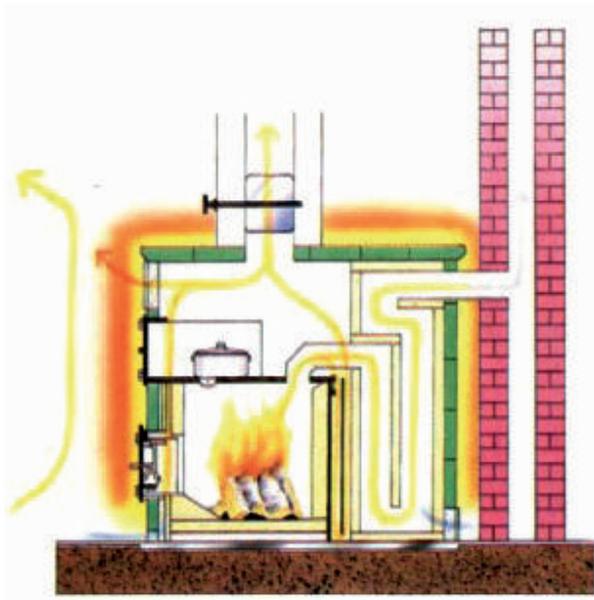


Schéma 21 : Poêle à accumulation

Pour s'en servir, il suffit de réaliser un feu vif de quelques heures, avec une température de foyer pouvant atteindre les 900 °C, et ceci deux fois par jour. Ils restituent ensuite progressivement la chaleur accumulée, principalement par rayonnement, grâce aux matériaux de très grande inertie qui le composent : briques ou béton réfractaires, carreaux de faïence ou roches diverses. Ainsi l'autonomie de ces poêles est de 8 à 20 heures en brûlant la charge de bois en 2 à 3 heures à plein régime. C'est un mode chauffage performant et agréable.

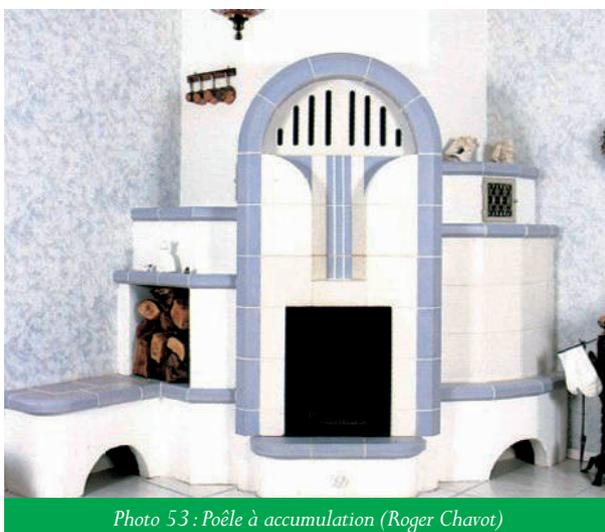


Photo 53 : Poêle à accumulation (Roger Chavot)

Leurs performances sont dues à la conjonction d'une combustion à haute température et d'un très bon échange de la chaleur du feu vers les matériaux.



Photo 54 : Poêle cheminée (Tulikivi)

Certains poêles sont équipés d'une plaque de cuisson et d'un four à pain. L'implantation de ces poêles imposants doit être pensée lors de la conception ou lors de la réhabilitation même du logement, tel un élément immobilier qu'ils constituent.

• **Caractéristiques :**

Rendement de 70 à 85 %

Combustible : bûches, briquettes

Autonomie : 8 à 20 heures

Alimentation : manuelle

L'investissement est à partir de 2 000€ pour les petits poêles mobiles et presque 20 000 pour les plus gros.

Les cuisinières

Les cuisinières sont des appareils d'appoint avec une convection à inertie moyenne et selon les modèles la possibilité d'une distribution d'eau chaude. Elles sont en acier ou en fonte avec généralement un foyer de brique réfractaire et parfois elles sont revêtues de faïence.

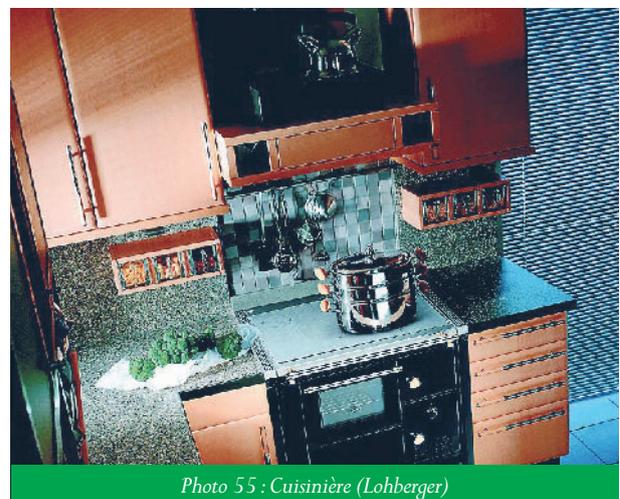


Photo 55 : Cuisinière (Lohberger)



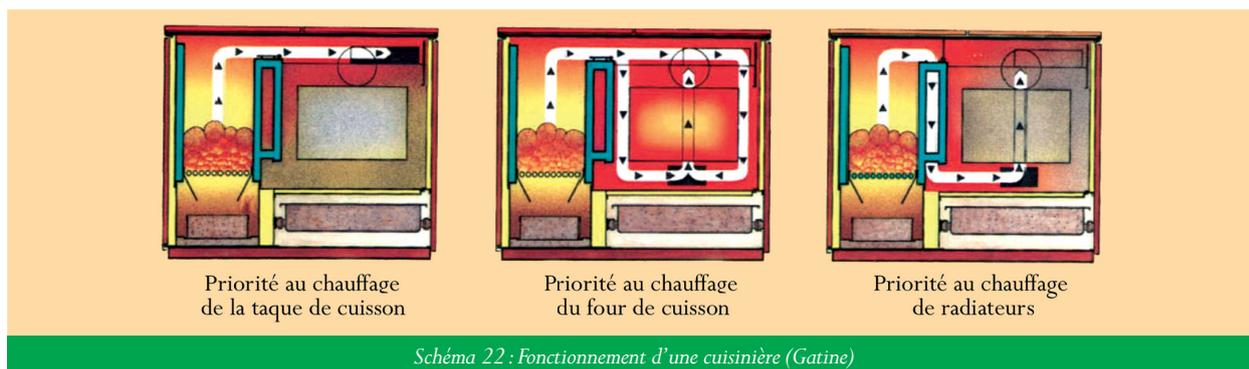


Schéma 22 : Fonctionnement d'une cuisinière (Gatine)

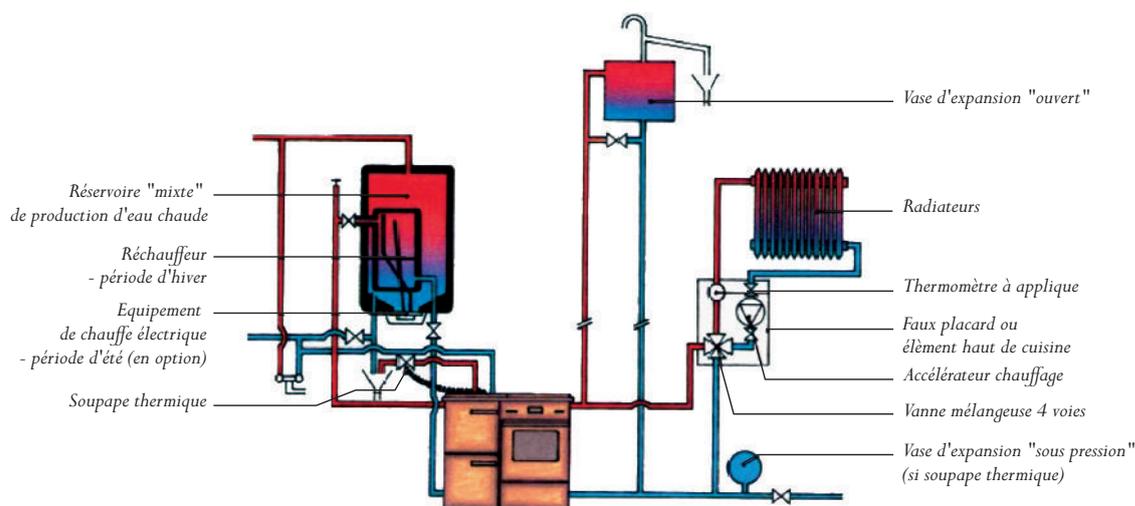


Schéma 23 : Schéma type d'installation conseillée (Gatine)

La cuisinière permet à la fois de faire la cuisine grâce à une plaque en fonte ou un four et de chauffer la pièce dans laquelle elle se trouve. Les cuisinières équipées d'un bouilleur peuvent alimenter un ballon d'eau chaude et plusieurs radiateurs. Le rendement des cuisinières varie de 50 à 70 %. Leur autonomie est limitée à quelques heures et nécessite donc des chargements fréquents. Les cuisinières permettent de chauffer quelques pièces.

• **Caractéristiques :**

- Rendement de 40 à 70 %
- Gamme de puissance de 5 à 30 kW
- Combustible : bûches, briquettes
- Autonomie : quelques heures
- Alimentation : manuelle
- Investissement : 3 000 à 15 000€

Les chaudières à bûches

Les chaudières à bûches sont utilisées comme installation de chauffage principal au bois. Elles distribuent la chaleur par l'intermédiaire du circuit de chauffage central et du ballon d'eau chaude sanitaire.

Il existe différents critères de choix d'une chaudière bûche :

- Le tirage : initialement uniquement naturel, il est désormais principalement forcé (assisté par ventilateur)
- Le type de combustion : à tirage naturel (montante), ou forcé

(combustion horizontale ou inversée)

- La présence d'un magasin : ce dernier étant de plus en plus gros, permettant une meilleure autonomie
- La régulation de plus en plus évoluée : vitesse variable, systèmes à clapets, sondes lambda
- L'étanchéité et les matériaux du foyer qui réduisent les pertes par rayonnement

• **Chaudières à tirage naturel (combustion montante traditionnelle)**



Schéma 24 : Chaudière à tirage naturel (Baxi)



Le bois est mis dans le foyer, toute la charge brûle simultanément. La régulation se fait par chaînette. L'investissement est moins élevé pour ces types de chaudières. La combustion irrégulière est difficile à maîtriser. Il comporte des risques de bistrage et de goudronnage. L'autonomie est faible. La mise en place d'un ballon tampon est conseillée pour améliorer l'installation.

• **Chaudières à tirage forcé**
(combustion inversée assistée par ventilateur)



Schéma 25 : Chaudière à tirage forcé (Boderus)

Le magasin à bois est séparé de la chambre de combustion. L'apport d'air est optimisé, la régulation se fait par ventilateur. Ces chaudières ont une autonomie moyenne à bonne. La mise en place d'un ballon tampon est conseillée pour améliorer l'installation. L'investissement est relativement élevé.

• **L'accumulation en ballon d'eau chaude**

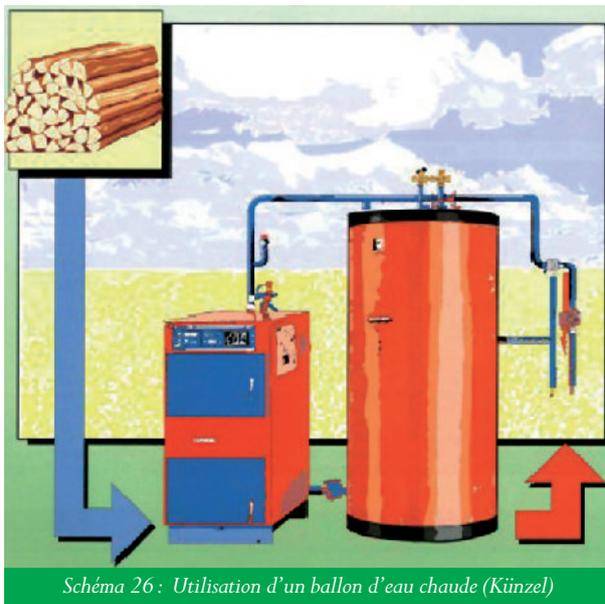


Schéma 26 : Utilisation d'un ballon d'eau chaude (Künzel)

Pour tous les types de chaudières bois, l'utilisation d'un ballon tampon d'accumulation est particulièrement intéressante. Ce système permet d'améliorer le fonctionnement, le rendement et la durée de vie de l'installation. Les besoins de chauffage sont largement inférieurs à la puissance de la chaudière pendant une grande partie de l'année. La chaudière fonctionne à un régime adapté grâce au ballon de stockage. La chaudière bois peut fournir de l'eau chaude sanitaire.

• **Caractéristiques :**

Chaudières à flamme inversée	Chaudières à combustion montante
Rendement de 70 à 85 %	Rendement de 40 à 70 %
Gamme de puissance de 15 à 150 kW	Gamme de puissance de 15 à 150 kW
Combustible : bûches, briquettes	Combustible : bûches, briquettes
Autonomie : 5 à 20 h	Autonomie : 4 à 10 h
Alimentation : manuel	Alimentation : manuel

L'investissement pour une chaudière à combustion montante est généralement compris entre 3000€ et 4000€ et de 4000 à 8000€ pour une chaudière à flamme inversée, il faut rajouté de 1500€ à 4000€ pour un système d'accumulation.

Les poêles à granulés

Les poêles à granulés sont pourvus d'une alimentation automatique en combustible, d'une grande autonomie et d'une régulation de leur puissance.

• **Description**

Les poêles à granulés sont une nouvelle génération d'appareils en fonte ou en brique réfractaire avec un habillage en acier ou en faïence. Ils sont munis d'une alimentation automatique en granulés de bois, d'une distribution de la chaleur par air pulsé. La combustion est régulée et optimisée en permanence par une régulation. Ces poêles brûlent des granulés de sciure compactée : ce combustible bois a un haut pouvoir calorifique et un taux d'humidité faible, il est d'une qualité constante et a un faible taux de fines. Il est facile à stocker et à manipuler. Les granulés sont amenés automatiquement par une vis depuis le fond du réservoir jusqu'au foyer ce qui permet d'obtenir une autonomie importante.

La chaleur est diffusée principalement par rayonnement à travers la masse du poêle et par convection à travers le système de ventilation. La ventilation sert à distribuer l'air de chauffage ainsi que l'air primaire et l'air secondaire nécessaires à la combustion des granulés.

Les poêles à granulés sont régulés à l'aide d'un thermostat, de sondes de température et généralement d'un microprocesseur. Cet appareil de chauffage domestique allie haute technologie et grande facilité d'utilisation. Il permet de chauffer quelques pièces. Des modèles existent avec un échangeur eau chaude, d'une puissance maximum de 15 kW. De plus si l'esthétique du poêle ne vous convient pas, il faut savoir que les fabricants proposent également leurs modèles sous forme d'inserts facile à installer.



• **Utilisation et entretien**

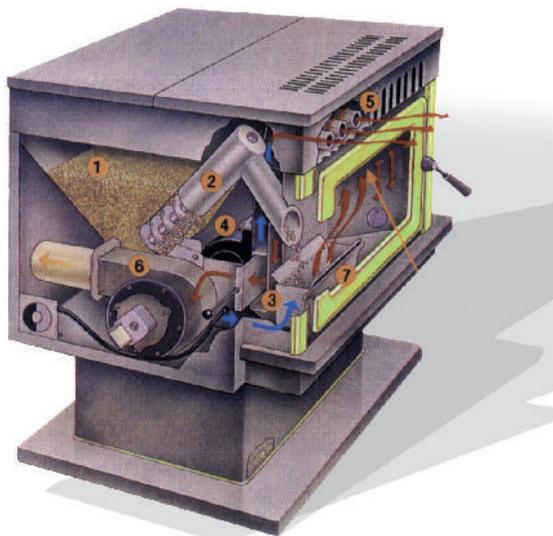
L'utilisation est très simple. Il suffit à l'utilisateur de remplir le réservoir de granulés (tous les 2 jours environ) et de choisir la température de la pièce. Le poêle se charge du reste : il démarre automatiquement (allumage automatique de plus en plus fréquent) et assure le confort désiré.

Un grattage quotidien du brûleur permet d'assurer une qualité de combustion. En ce qui concerne les cendres, elles tombent dans un cendrier qu'il faut vider tous les 1 à 4 semaines (en fonction du volume de ce dernier et de l'utilisation). Une maintenance annuelle est fortement conseillée, elle doit être assurée par un spécialiste.

• **Caractéristiques**

- Rendement de 70 à plus de 90%
- Gamme de puissance de 3 à 15 kW
- Combustible : granulés
- Autonomie : 24h à 120 heures
- Alimentation : automatique

L'investissement est généralement compris entre 3000€ et 8000€.



- 1 – Réservoir de granulés
- 2 – Vis sans fin
- 3 – Air de combustion
- 4 – Ventilateur convecteur
- 5 – Echangeur d'air
- 6 – Extracteur de fumées
- 7 – Foyer de combustion

Schéma 27 : Principe de fonctionnement (envirofire)



Photo 56 : Poêle à granulés télécommandé (MCZ)



Photo 57 : Poêle à granulés (Thermorossi)

Les chaudières automatiques à bois déchiqueté

Les installations de chauffage automatique au bois constituent aujourd'hui un moyen de chauffage au bois pratique et aux performances optimisées. Les installations de chauffage automatique au bois s'adressent en priorité au monde rural : bâtiments avec de grosses consommations et disposant de place, d'équipements de manutention adaptés ou de fournisseurs de combustibles proches. Les chaudières à bois sont classables en 2 catégories : les chaudières à alimentation semi-automatique, les chaudières automatiques.

• **Les chaudières à alimentation semi-automatique**



Photo 58 : Chaudière à alimentation semi-automatique (énergie 79)

Pour les chaudières à alimentation semi-automatique, le fonctionnement lié à la combustion ainsi qu'à la régulation de la production de chaleur présente des automatismes comparables aux chaudières automatiques. La différence avec ces dernières ce



situé dans la présence d'une trémie intégrée à la chaudière qui doit être chargée manuellement à partir d'un espace de stockage attenant à la chaufferie. La trémie est généralement constituée d'un réservoir métallique avec un système de désilage incorporé. Les petits brûleurs sont des dispositifs simplifiés des chaudières à grille fixe, en particulier pour le secteur domestique. Ils peuvent être vendus soit intégrés dans une chaudière ou séparément. Ils sont constitués d'un creuset ou d'un tunnel de combustion, d'un dispositif d'alimentation en combustible et d'une trémie à combustible de faible capacité. On considère que ces équipements ont par conséquent un fonctionnement semi-automatique. Ils n'acceptent que des plaquettes fines et bien sèches.

Investissement : 3 000 à 15 000 €

• Les chaudières automatiques

Pour les chaudières automatiques, le bois arrive dans le foyer de la chaudière depuis un silo d'alimentation, par la poussée d'une vis. Ces chaudières disposent d'une automatisation complète : depuis le silo d'alimentation jusqu'au foyer de la chaudière.

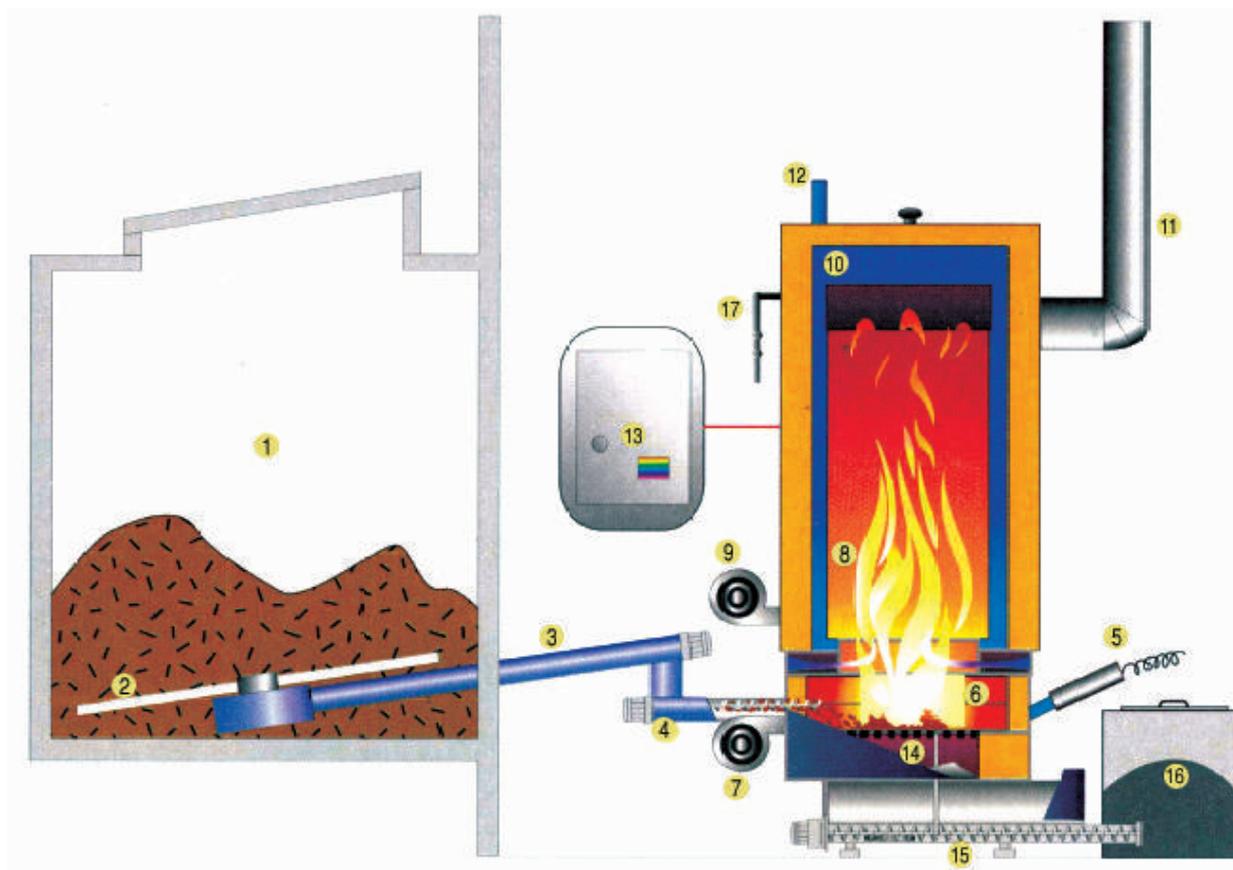
Des régulations de combustion plus perfectionnées ainsi que le décentrage automatique du foyer peuvent être installés.

Il existe différents types de foyers :

- les foyers à vis de poussée ou foyer volcan (gamme de puissance de 15 à 5000 kW - humidité de 15 à 45 % - granulométrie maximum de 3 cm)
- les foyers à grilles fixes
- les foyers à grilles mobiles (gamme de puissance de 120 à 25000 kW - humidité de 25 % à 65 % - granulométrie maximum de 10 à 30 cm)
- les foyers à grilles mobiles tournantes (gamme de puissance de 8000 à 65000 kW)
- les foyers à lits fluidisés (gamme de puissance de 8000 à 65000 kW)

Il existe différents types de systèmes d'extraction et de transport :

- Les vis sans fin.
- Les tapis
- Les extracteurs rotatifs à vis
- Les extracteurs à lames de ressort
- Les extracteurs par racleurs



1- Silo d'alimentation

2- Dessilage rotatif à lames souples

3- Vis de transfert

4- Vis d'alimentation

5- Allumage automatique

6- Chambre de combustion

7- Ventilateur d'air primaire

8- Chambre de post-combustion

9- Ventilateur d'air secondaire

10- Echangeur de chaleur

11- Cheminée

12- Départ réseau de chaleur

13- Armoire de régulation

14- Grille de décentrage

15- Vis de décentrage

16- Conteneur à cendre

17- Manivelle de dépolluierage de l'échangeur

Schéma 28 : Schéma et principe de la chaudière automatique (Hargassner)



Les chaudières automatiques à bois se partagent en deux catégories : celles à grille fixe et celles à grille mobile.

-Les chaudières à grille fixe

Ces chaudières intègrent dès leur conception, l'ensemble des dispositifs utiles à l'alimentation, la combustion, l'échange et la régulation dans la production de chaleur à partir du bois.

Elles ont la particularité d'être équipées d'une grille fixe, adaptée à des combustibles de bonne qualité : granulométrie fine, taux de cendres faible et humidité modérée. De ce fait, elles sont de conception relativement simple. Elles sont toujours alimentées à partir d'un silo à combustible de forte contenance.

Il existe deux types de grilles fixes, comme on peut le voir sur les schémas ci-dessous.

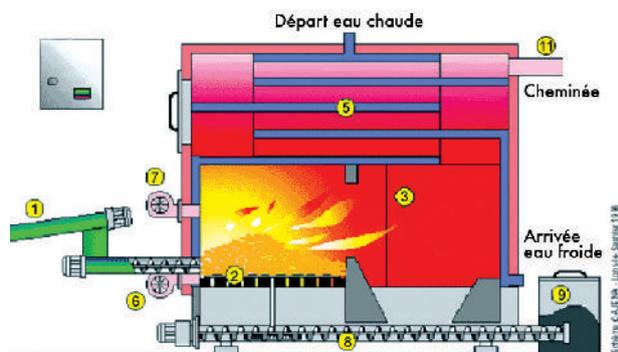


Schéma 29 : Chaudière à grille plane et vis de poussée horizontale

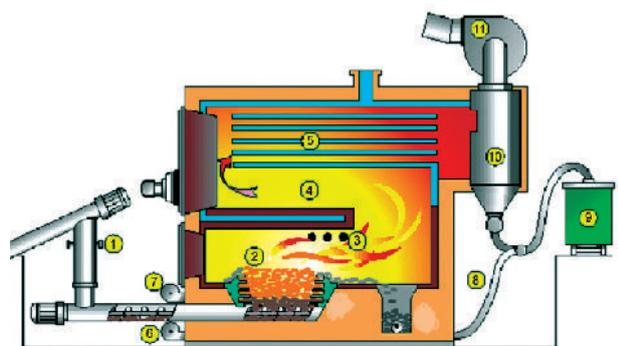


Schéma 30 : Chaudière à pot foyer

1. Alimentation en combustible.
2. Zone de pyrolyse – injection d'air primaire.
3. Chambre de combustion des gaz – Injection d'air secondaire.
4. Chambre de post-combustion pour la combustion totale des gaz.
5. Transfert de la chaleur dans l'échangeur de chaleur – production d'eau chaude.
6. Ventilateur d'injection de l'air primaire.
7. Ventilateur d'injection de l'air secondaire.
8. Evacuation mécanisée des cendres et des poussières.
9. Bac à cendres.
10. Filtres cycloniques.
11. Evacuation mécanisée des fumées.

-Les chaudières à grille mobile

Les chaudières à grille mobile ont des capacités supérieures en matière d'acceptabilité du bois :

Elles sont équipées d'une grille mobile permettant l'étalement du combustible sur une grande surface de séchage et de gazéification, et garantissant l'évacuation mécanisée des cendres.

Elles disposent d'un foyer de plus forte inertie permettant le séchage de bois plus humides.

Elles disposent d'une chambre de combustion plus longue, plus vaste, acceptant ainsi des volumes de gaz plus importants. Ces volumes plus importants sont générés lors de l'usage de bois humide, par l'apport supplémentaire d'eau pour un même volume de combustible.

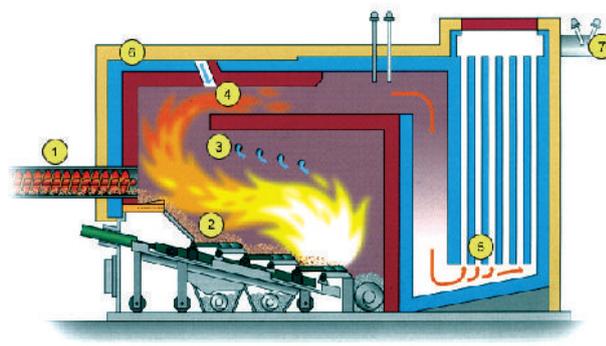


Schéma 31 : Chaudière automatique à grille mobile

1. Alimentation en combustible.
2. Zone de pyrolyse – injection d'air primaire.
3. Chambre de combustion des gaz – Injection d'air secondaire.
4. Chambre de post-combustion pour la combustion totale des gaz.
5. Transfert de la chaleur dans l'échangeur de chaleur – production d'eau chaude.
6. Bonne isolation thermique pour limiter les pertes par rayonnement.
7. Evacuation mécanisée des fumées.

• Les avant foyers

Les avant-foyers sont aux chaudières à grille mobile ce que sont les petits brûleurs aux chaudières à grille fixe. Ce sont des foyers à forte inertie que l'on place devant des chaudières qui ne sauraient accepter certains combustibles humides : par exemple des plaquettes forestières dans une chaudière à mazout de conception ancienne ou des plaquettes humides dans une chaudière à bûches ou à bois sec. Les avant-foyers peuvent utiliser en fonction de la puissance choisie les technologies de grille fixe ou mobile et sont soit semi-automatiques, soit automatiques. Dans les toutes petites puissances, ils permettent d'accéder à l'usage des bois fortement humides.

• Recommandations pour choisir la chaudière adaptée

D'une manière générale, les choix doivent s'orienter vers un bon rapport qualité prix, une adéquation parfaite avec le combustible choisi, des performances optimales (rendement, émissions) et des contraintes d'utilisation minimales. Ces contraintes peuvent être abaissées grâce à une régulation poussée, une autonomie accrue, une automatisation du déchargement et du chargement du silo.



• **Automatismes en option**

- Décendrage du foyer (Sauf pour grilles mobiles)
- Dépoussiérage des tubes de fumée
- Pour un fonctionnement entièrement automatisé, on peut recourir à un dispositif d'allumage automatique dans le cas des combustibles secs.

• **Qualité des rejets atmosphériques – optimisation de la combustion**

- Niveau de régulation : Modulant ou linéaire.

La plupart des installations automatiques au bois sont désormais équipées d'une régulation de puissance linéaire entre 100 et 30 % de la puissance nominale, dans cette gamme 0 à 300 kW. En dessous de 30 % de la puissance, les installations sont exploitées en mode marche arrêt avec des rendements moindres. Les organes les plus fréquemment utilisés sont la sonde de foyer et la sonde.

- Rejets de poussières : Filtres cycloniques

L'investissement est compris entre 12 000€ à 20 000€ pour les petites chaudières individuelles.

Les chaudières automatiques aux granulés de bois

• **Description**

Les chaudières automatiques aux granulés de bois sont compactes et faciles à intégrer au bâtiment. Elles sont munies d'une alimentation automatique en granulés de bois et la combustion est régulée et optimisée en permanence par une régulation poussée. Ces chaudières brûlent, des granulés de sciures compactées : un combustible bois à haut pouvoir calorifique et faible taux d'humidité, d'une qualité constante et normalisé sans poussières. Le combustible est livré par camion-souffleur dans un silo de petites tailles. Les granulés descendent au fond du silo, où une vis sans fin les conduit vers la chaudière.



Photo 59 : Chaudière automatique à granulés (Hargassner)

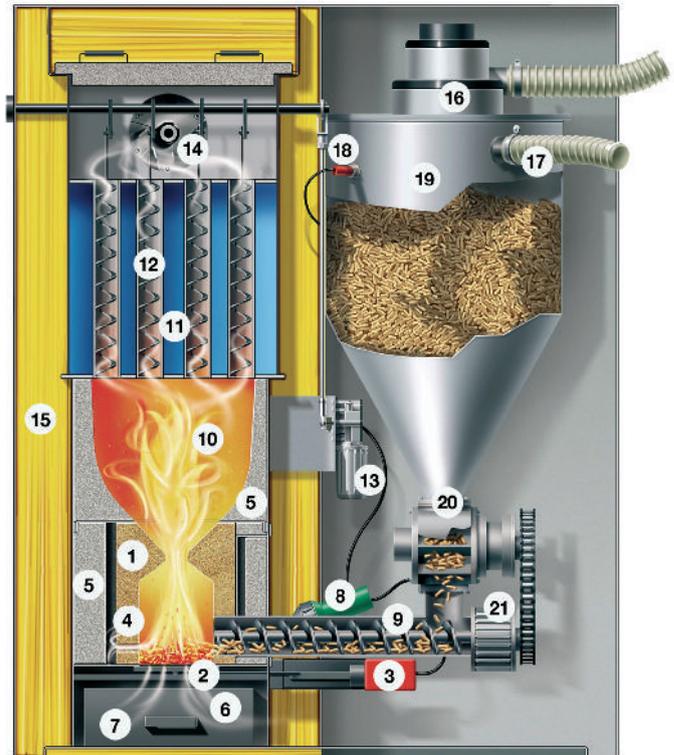
• **Caractéristiques**

- Rendement de 80 à 100 % (condensation)
- Gamme de puissance de 3 kW à plusieurs MW
- Combustible : granulés
- Autonomie : 1 jour à 1 an
- Alimentation : automatique

L'investissement est compris entre 8 000 à 20 000 €.

Il existe également des silos flexibles dont l'installation est simple. Le granulé étant un combustible fluide, il s'écoule vers la vis sans fin sans extracteur.

• **Fonctionnement**



- | | |
|----------------------------------|---|
| 1. Foyer en réfractaire | 13. Dispositif de nettoyage de l'échangeur |
| 2. Grille de décendrage | 14. Extracteur |
| 3. Moteur de décendrage | 15. Isolation |
| 4. Air secondaire avec admission | 16. Turbine d'aspiration |
| 5. Isolation réfractaire | 17. Circuit fermé d'aspiration, sans filtre, sans entretien |
| 6. Air primaire | 18. Détecteur de niveau |
| 7. Cendrier | 19. Trémie cyclonique |
| 8. Allumage automatique | 20. Ecluse de sécurité |
| 9. Vis d'alimentation | 21. Moteur d'entraînement |
| 10. Chambre de combustion | |
| 11. Echangeur | |
| 12. Turbulateurs | |

Schéma 32 : Principe de fonctionnement d'une chaudière à granulés

Informé en temps réel des températures en différents points de la chaudière et pour certaines de la proportion d'oxygène dans le foyer, le microprocesseur optimise à chaque instant l'alimentation des granulés et les débits d'air en fonction de la demande de



chaleur pour atteindre des rendements de combustion supérieurs à 90%. Grâce au très faible taux de cendre des granulés et à la configuration des chaudières, quelques décentrages mensuels voire annuels sont suffisants. Entièrement programmable, elle peut assurer le hors-gel lors d'une absence prolongée et garantir une maison chaude prête à vous accueillir à votre retour.

D'une puissance à partir de 3 kW, la chaudière à granulés est la technologie de chauffage central au bois la plus automatique. Elle nécessite l'installation d'un silo, relié au foyer de la chaudière par un système d'alimentation automatique. Ce dispositif assure un confort identique aux systèmes au fioul ou au gaz.

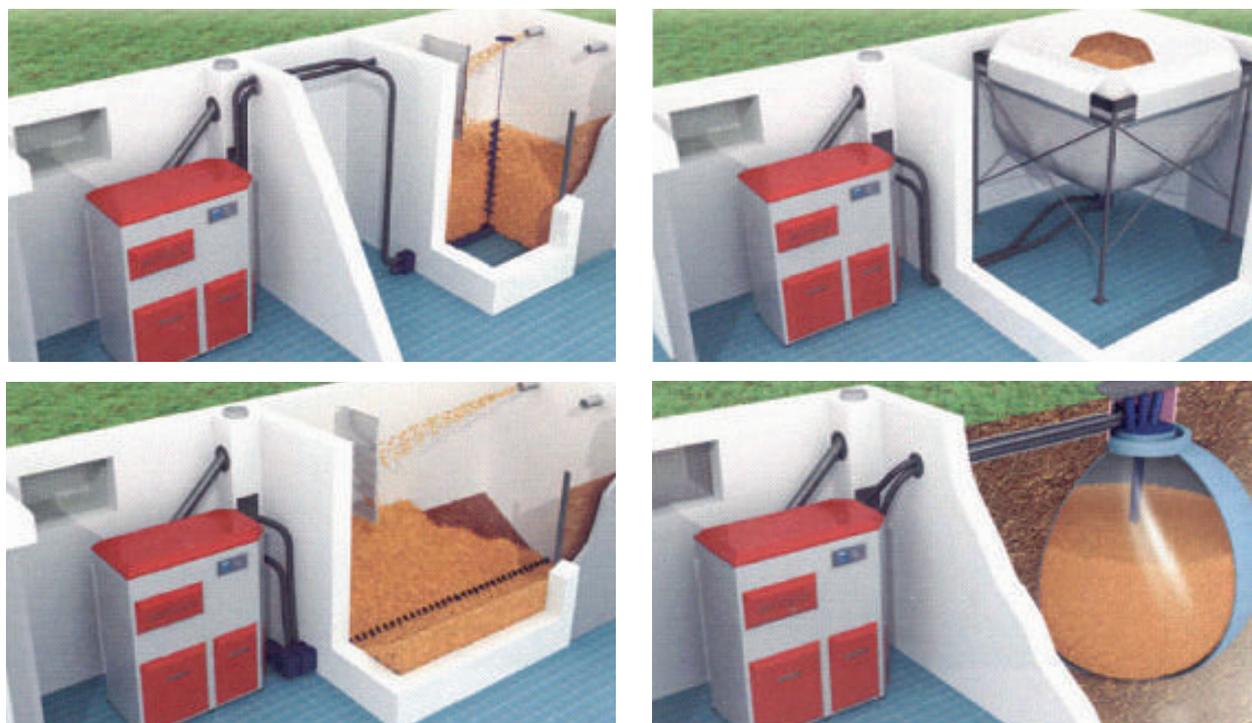


Schéma 33: Différentes possibilités d'implantation du silo (Biotech)

• L'approvisionnement

L'alimentation du silo se fait au moyen d'un camion citerne équipé d'un compresseur qui propulse le produit jusqu'à plusieurs dizaines de mètres à l'horizontale et plus de 10 mètres en vertical. Cette particularité permet de placer le silo, pratiquement où l'on veut, ou plutôt où l'on peut : de plain pied, en sous-sol, à l'étage,

enterré, à l'extérieur et aussi à l'arrière de votre maison là où le camion ne peut pas approcher. La chose importante est de le dimensionner le plus grand possible, non pas pour avoir deux ans d'autonomie, mais plutôt pour bénéficier de tarifs plus avantageux grâce à des livraisons plus importantes

Tableau 17 : Critères pour le choix d'une chaudière à bois

Technologie	Rendement global	Plage de puissance	Granulométrie & humidité du combustible	Autonomie	Utilisation	Investissement
Chaudières avec petits brûleurs à plaquette	70 à 85 %	8 à 50 kW	1 à 3 cm 8 < H < 25 %	1 jour à une semaine	Chargement manuel de la trémie	Peu élevé
Chaudières automatiques à grille fixe	75 à 85 %	15 kW à 5 MW	3 cm 8 < H < 45 %	3 jours à un an	Entièrement automatique	Elevé
Avant foyers	70 à 80%	25 kW à 5 MW	1 à 3 cm 30 < H < 45 %	12 heures à un an	Système peu courant	Elevé
Chaudières automatiques à grille mobile	70 à 80 %	30 kW à 25 MW	3 cm Maximum 10 cm 25 < H < 55 %	3 jours à un an	Entièrement automatique	Très élevé
Chaudières à granulés	85 à 100 %	3 kW à 5 MW	3 cm	1 mois à un an	Livraison pneumatique	Moyen

H= humidité sur poids brut



Tableau 18 : Comparatif des appareils de chauffage domestique

	Confort utilisation	Facilité d'implantation	Confort énergie	Esthétique ambiance	Investissement	Coûts fonctionnement	Sécurité	Environnement
Cheminées à foyer ouvert ou âtres		*		***	€	€€		
Inserts et foyers fermés sans récupérateur	*	*	*	***	€	€€	*	*
Inserts et foyers fermés avec récupérateur	*	*	*	***	€	€€	*	*
Poêles traditionnels et poêles cheminée	*	***	*	**		€€	*	*
Poêles performants	*	***	*	**	€	€	**	**
Poêles à accumulation	**	**	***	***	€€€	€	***	***
Cuisinières	*	***	*	***	€€€	€€	*	*
Chaudières à bûches tirage naturel	*	**	**		€	€€€	*	*
Chaudières à bûches tirage forcé	*	**	**		€€	€€	**	**
Chaudières à bûches avec accumulateur	**	*	***		€€€	€€	**	**
Chaudières automatiques à bois déchiqueté	**		***		€€€	€	**	***

Blanc = Médiocre

* = Moyen

** = Bon

*** = Très bon

Blanc = Coût très bas

€ = Coût moyen

€€ = Coût élevé

€€€ = Coût très élevé



Tableau 19 : Récapitulatif des caractéristiques des appareils

	Rendement global moyen	Plage de puissance	Type de combustible	Autonomie de chauffage	Usage	Investissement (hors génie civil)
Cheminées à foyer ouvert ou âtres	0 à 30 %	10 à 100 kW	Bûches, briquettes	1 à 3 h	Manuel	1000 à 8000 €.
Inserts et foyers fermés sans récupérateur	30 à 60 %	8 à 30 kW	Bûches, briquettes	3 à 6 h	Manuel	2 000 à 8000 €
Inserts et foyers fermés avec récupérateur	40 à 70 %	8 à 30 kW	Bûches, briquettes	3 à 6 h	Manuel	2 500 à 8000 €
Poêles traditionnels et poêles cheminée	40 à 70 %	5 à 20 kW	Bûches, briquettes	3 à 6 h	Manuel	650 à 3 500 €.
Poêles turbo ou à post combustion	60 à 80 %	5 à 20 kW	Bûches, briquettes	3 à 10 h	Manuel	1000 à 4500 €
Poêles à accumulation	70 à 85 %	8 à 30 kW	Bûches, briquettes	8 à 20 h	Manuel	2 000 à 20 000 €.
Poêles à granulés	70 à 90 %	3 à 15 kW	Granulés	2 à 5 jours	Semi-automatique	3 000 à 8 000 €
Cuisinières	40 à 80 %	5 à 30 kW	Bûches, briquettes	3 à 6 h	Manuel	3 000 à 15 000 €
Chaudières à bûches tirage naturel	40 à 70 %.	15 à 150 kW	Bûches	6 à 10 h	Manuel	3 000 à 4 000 €
Chaudières à bûches tirage forcé	70 à 90 %.	15 à 150 kW	Bûches	6 à 20 h	Manuel	4 000 à 8 000 €
Chaudières à bûches avec accumulation	70 à 85 %.	15 à 100 kW	Bûches	12 à 72 h	Manuel	7 000 à 12 000 €
Chaudières à granulés	80 à 100 %	3 à 1 MW	Granulés	1 an	Automatique	8 000 à 12 000 €
Chaudières automatiques à bois déchiqueté	70 à 85 %	25 à 1 MW	Plaquettes forestières	1 jour à 1 an	Automatique	12 000 à 20 000 €
Petits brûleurs à plaquettes	70 à 80 %	8 à 50 kW	Plaquettes, granulés, sciure	1 à 3 jours	Semi-automatique	3 000 à 15 000 €

• Rendement : il fait varier la consommation de bois. Le choix d'un appareil performant permet de faire des économies de combustible.

• Puissance : le choix de la puissance dépend des besoins du bâtiment à chauffer (climat, volume et isolation), du rendement de l'appareil de chauffage, du niveau de température souhaité et du type d'usage de l'appareil (appoint, agrément ou chauffage principale).

• Combustible : les critères de choix pour le combustible sont la disponibilité locale de celui-ci (quantité de fournisseur), le mode de stockage et de livraison, ses caractéristiques (humidité, granulométrie et pouvoir calorifique), son prix et la manipulation nécessaire pour alimenter l'appareil de chauffage.

• Prix de l'investissement : c'est une indication de prix qui ne prend en compte que le matériel seul.



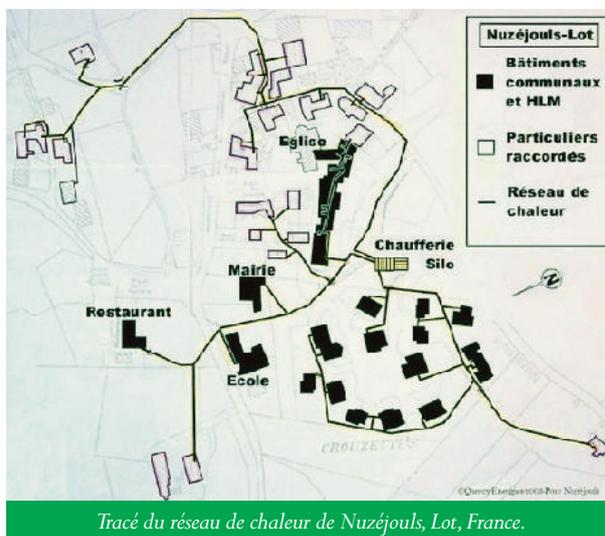
Réseau de chaleur

Définition

Un réseau de chaleur permet de relier plusieurs installations de chauffage à eau chaude à une chaufferie unique. Il est composé des éléments suivants :

- Une ou plusieurs chaufferies pour la production de chaleur
- Un système de distribution primaire pour le transport de la chaleur
- Des réseaux de distribution secondaires chez les usagers

Pour la France, il existe également une définition juridique du réseau de chaleur selon la loi sur la chaleur de 1980. C'est un réseau de chaleur (comme défini précédemment) pour lequel le producteur de chaleur est juridiquement distinct des consommateurs qui doivent être au minimum deux.



Tracé du réseau de chaleur de Nuzéjols, Lot, France.



Photo 60 : Chaufferie du réseau de chaleur de Nuzéjols (Lot, France)

Un réseau de chaleur au bois peut être envisagé dans différents cas de figure :

- **Commune rurale** : un réseau de chaleur est créé par la commune ou par une coopérative agricole pour permettre l'installation d'une chaufferie bois.

- **Agglomération** : la diversification des sources d'approvisionnement en énergie d'un réseau de chaleur existant ou l'extension de la chaufferie se fait par l'installation d'une ou plusieurs chaudières bois en substitution ou en complément des chaudières existantes. Certaines chaudières existantes au charbon de puissance importante (10 à 100 MW) peuvent même être requalifiées en chaudières à co-combustion bois-charbon. Le maître d'ouvrage peut être une collectivité ou une entreprise spécialisée en production et vente d'énergie.

- **Industrie du bois** : une scierie soucieuse de mieux valoriser ses déchets investit dans une chaufferie et vend de l'énergie à ses voisins proches ou moins proches. Généralement dans ce cas, le réseau est propriété de la commune ou d'une coopérative d'usagers.

- **Parc privé de bâtiments** : un maître d'ouvrage décide de choisir le bois pour alimenter son propre parc de bâtiments : centre hospitalier, base militaire, quartier de logements collectifs, grande usine...

La production de chaleur

La production de la chaleur est assurée par une chaufferie bois seule ou avec appoint. Le bois est pour cela au préalable déchiqueté ou granulé de manière à permettre une alimentation automatique de la chaudière. Le choix du type de chaudière va dépendre des besoins énergétiques. Ils définissent la puissance de la chaudière à installer et le fluide caloporteur (eau chaude, eau surchauffée, vapeur), et donc le combustible adapté.

En principe, la chaudière bois sera dimensionnée en base : avec environ 50 % de la puissance totale elle pourra satisfaire environ 80 % des besoins. Car la puissance maximale d'une installation n'est appelée que quelques jours durant l'année et la bi-énergie permet de rationaliser les investissements.

Fonctionnement d'une chaufferie automatique au bois :

- **Le silo d'alimentation**

Le combustible bois déchiqueté est livré dans le silo par des camions ou par des bennes agricoles pour les petites chaufferies. Le silo est un stockage intermédiaire entre le stock principal et la chaudière. Il est généralement maçonné, placé à côté de la chaufferie et équipé d'un système d'extraction du combustible (désilage). Sa taille permet une autonomie de plusieurs jours à plusieurs semaines. Suivant les installations, le silo sera enterré ou de plain.

Exemple : 144 m³ pour une puissance de 800 KW (6 x 6 x 4 m).

Le stockage principal est géré par le fournisseur de bois qui peut être dans certains cas également le maître d'ouvrage (Communes forestières, industries du bois, coopératives agricoles). Dans ce dernier cas de figure, le stockage peut être accolé à la chaufferie.

- **Extraction et transfert du combustible**

Le combustible bois est extrait du silo grâce à un système d'extraction. Il peut être constitué par un système rotatif à vis





Schéma 34 : Chaufferie et stockage d'un réseau de chaleur

ou à pales dans le cas des petites installations ou par des racleurs au fond du silo actionnés par des vérins pour les autres. Le bois est ensuite transporté du silo jusqu'au foyer de la chaudière par l'intermédiaire d'une chaîne transporteuse ou d'une vis sans fin.

• **La ou les chaudières**

Pour la ou les chaudières bois, les technologies permettent aujourd'hui de satisfaire tous les types de besoins de 15 kW à 600 MW avec des foyers adaptés aux caractéristiques des différents combustibles.

Les chaudières selon leur type sont capables d'accepter des granulés, de la sciure, des plaquettes ou des écorces broyées, le tout calibré aux dimensions maximales variant de 3 à 10 cm. Celles qui acceptent des dimensions de combustible plus importantes le font au détriment de leurs performances et de leur fiabilité.

Côté humidité du bois, les plages possibles sont les suivantes :

Technologies	% d'humidité
Petits brûleurs	10 à 25
Chaudières à grille fixe	20 à 45
Chaudières à grille mobile	25 à 60
Chaudières spéciales à grille mobile	35 à 65

Ce qu'il faut néanmoins savoir, c'est que plus une chaudière est capable d'accepter un combustible humide plus elle est complexe, imposante et donc chère. Le choix d'un combustible humide ne se justifiera donc qu'à la condition de consommations importantes.

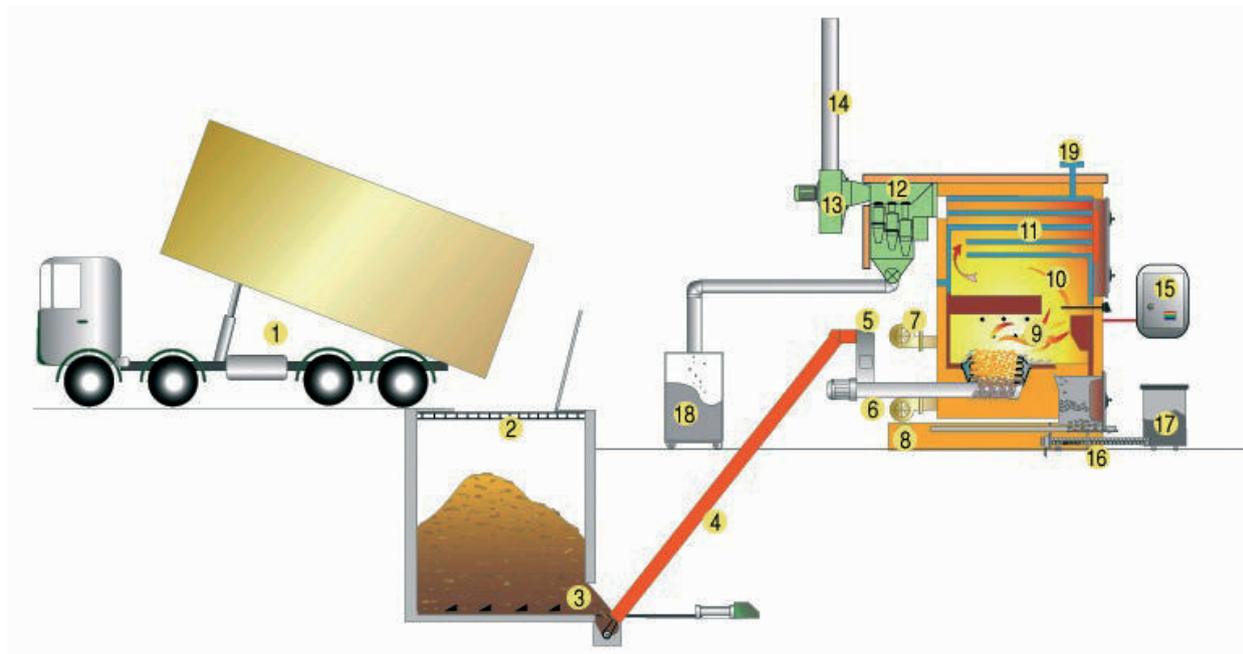
Le volume des chaudières à bois est plus important que les chaudières à mazout : de deux à trois fois. Il faut également compter sur le silo à implanter qui va nécessiter un volume 7 ou 8 fois celui de la chaudière au minimum.

Pour le choix d'une chaudière, toujours demander à rencontrer des usagers des modèles qu'on est en train d'étudier.

• **Traitement des fumées et des cendres**

Les poussières contenues dans les fumées, à partir de certaines puissances, doivent être éliminées par un dépoussiéreur permettant des rejets respectant les seuils imposés.

Les cendres quant à elles peuvent être évacuées par un système de décentrage automatique. Elles pourront faire l'objet d'une



- | | | | | |
|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|---------------------------|
| 1. Véhicule de livraison | 5. Système coupe-feu | 9. Foyer et chambre de combustion | 13. Extracteur de fumées | 16. Décentrage |
| 2. Silo d'alimentation | 6. Système de dosage | 10. Chambre de post-combustion | 14. Cheminée | 17. Conteneur à cendres |
| 3. Système d'extraction | 7. Ventilateur d'air secondaire | 11. Échangeur | 15. Armoire de commande et de régulation automatique | 18. Conteneur à poussière |
| 4. Système de transfert | 8. Ventilateur d'air primaire | 12. Traitement des fumées | 19. Départ de la chaleur | |

Schéma 35 : Fonctionnement d'une chaufferie automatique bois



valorisation agronomique pour les bois sains, ou être mises en décharge.

Le tonnage de cendre obtenu après combustion est compris entre 0,5 et 5 % du tonnage de bois anhydre utilisé.

Les chaudières modernes disposent toutes de régulations de puissance et de combustion permettant un rendement élevé et des émissions minimisées.

Le réseau primaire pour la distribution de chaleur

Les réseaux de chaleur au bois sont le plus souvent exploités avec un circuit de production distinct des circuits de distribution. Ce réseau primaire est composé de deux conduites isolées et généralement enterrées. Une conduite transporte le fluide caloporteur chaud en provenance de la chaufferie et dessert les sous-stations des bâtiments raccordés. L'autre conduite ramène le fluide refroidi à la chaufferie.



Photo 61 : Réseau primaire de distribution de chaleur

Les conduites utilisées pour les réseaux de chaleur sont de plusieurs types :

• Réseau en caniveau pour le chauffage urbain

Le tube est en acier avec une isolation coquille en laine de roche et finition tôle.

Champs d'application : La température maximum est inférieure à 200°C et la pression maximale est inférieure à 30 bars

• Réseau acier pré-isolé

Le tube est en acier avec une isolation en mousse polyuréthane et une enveloppe extérieure protectrice en polyéthylène (PEHD).

Champs d'application : La température maximum est de 110°C (130° et 160° pour des procédés spéciaux) et la pression maximum est inférieure à 30 bars. Ce système nécessite des coussins au niveau des coudes, des lyres, des compensateurs pour reprendre les dilatations.

• Réseau plastique pré-isolé pour les petits et micro-réseaux

Le tube est en polyéthylène réticulé ou polybutylène (thermo soudable) avec une isolation en mousse polyuréthane et une

enveloppe extérieure en polyéthylène (PEHD).

Champs d'application : La température maximum est comprise entre : 90 et 95 °C et la pression maximum est comprise entre 6 bars et 10 bars Le diamètre maximum est DN80 à DN100 en rouleau de longueur 100 à 200 mètres selon le fournisseur. Il faut prévoir un traitement de l'eau du circuit chauffage. L'utilisation pour l'eau chaude sanitaire est possible.

La plupart des fournisseurs proposent également des tubes plastiques pré-isolés bi-tube.

• Les autres types de conduites pour réseaux de chaleur

Tubes pré-isolés en résine armée

Tubes pré-isolés en fonte

Tubes pré-isolés en inox ondulé

Systèmes de tubes concentriques

L'arrivée du réseau chez le consommateur

Généralement le transfert de chaleur entre le réseau primaire et le système de chauffage de l'usager se fait au niveau d'une sous-station de transfert. Les deux circuits hydrauliques sont totalement séparés, un échangeur de chaleur permet le transfert de la chaleur sans mettre en contact les deux fluides.

Il existe pour les réseaux basse température des circuits uniques.

La sous-station remplace l'installation de chauffage classique (chaudière, cuve à mazout, conduit de fumée, local chaufferie). Elle permet de distribuer la chaleur à l'usager de façon optimale. Le réseau ne cède de la chaleur que sur demande de la régulation de l'usager. La puissance maximale de la sous-station est réglée en limitant le débit maximal, et ce indépendamment des pressions et des températures qui règnent dans le réseau de distribution de chaleur. Le régulateur central de chaque sous-station peut réguler également la température de départ de certains circuits de chauffage pour chaque usager, ainsi que la production d'eau chaude sanitaire.

Les sous-stations comprennent en général les composants suivants :

- Un échangeur de chaleur (à plaques ou à faisceaux tubulaires),
- Une vanne de régulation de la pression différentielle,
- Une vanne de limitation du débit maximal,
- Une vanne de régulation du débit avec servomoteur (existe également en version vanne multifonctions qui limite le débit et la pression, ou avec limitation de la température retour),
- Une régulation électronique du chauffage asservie aux conditions climatiques,
- Un affichage de la pression et de la température, des vannes de sectionnement, un capteur d'impuretés,
- Un compteur de chaleur,
- Une bouteille casse-pression côté secondaire chargée d'adapter la température et la pression à l'installation de l'utilisateur.

Les sous-stations sont également équipées d'équipements permettant le télésuivi par l'exploitant.



Les rendements

Rendement technique de combustion

Il indique quelle est la portion de l'énergie contenue dans le combustible qui est effectivement transformée en chaleur, respectivement quelle est la portion qui est perdue par les effluents gazeux. Un rendement technique de combustion élevé va de pair avec des températures de fumées basses, un faible excédent d'air et de faibles émissions de monoxyde de carbone.

Rendement de la chaudière

En plus du rendement technique de combustion, le rendement de la chaudière tient compte des pertes par rayonnement et par les imbrûlés restants sur la grille. Les pertes par rayonnement sont dues à la chaleur transmise par la chaudière à l'air de la chaufferie. Elles dépendent de la grandeur de la chaudière, de sa température et de son isolation. Les pertes sur grille sont les résidus encore combustibles contenus dans les cendres du foyer.

Les pertes par les effluents gazeux, les pertes par rayonnement et celles sur grilles sont généralement désignées par les pertes d'exploitation. Le rendement de la chaudière donne le rapport entre l'énergie introduite dans la chaudière (bois) et la chaleur utilisable qui en ressort (énergie utile) mesuré sur une courte période. Un bon rendement de la chaudière peut être atteint grâce à un bon rendement technique de combustion, une bonne isolation, une bonne combustion des cendres et la récupération de la chaleur résiduelle de la chaudière.

Rendement de l'installation

En plus du rendement de la chaudière, le rendement de l'installation tient compte des pertes causées par l'accumulateur et la distribution de chaleur. De plus, les énergies auxiliaires nécessaires aux pompes, ventilateurs et systèmes de transport sont également prises en compte.

Rendement annuel

Le rendement annuel donne le rendement moyen de l'installation durant toute une période d'utilisation. Il représente le rapport entre la quantité d'énergie livrée par l'installation et l'énergie introduite dans la chaudière (bois). Ce rendement tient compte des pertes causées par les périodes d'attente et de charge partielle.

Un bon rendement annuel peut être atteint par :

- Un rendement technique de combustion élevé,
- Un rendement de chaudière élevé
- Un dimensionnement correct de l'installation (les chaudières surdimensionnées coûtent en général des pertes accrues)
- Eventuellement la répartition de la puissance sur deux ou plusieurs chaudières.

Les poêles et fourneaux situés dans les locaux habitables ont généralement des rendements assez élevés car les pertes par rayonnement servent directement au chauffage des locaux.

Unités & conversions

Les unités dérivées du système international

Tableau 20 : Les unités

Grandeur	Nom	Symbole	Correspondances
Force	Newton	N	1kgf = 9,81 N
Travail, Energie, Quantité de chaleur	Joule	J ou N·m	Kilowattheure 1 kWh = 3,6 10 ⁶ J
Puissance, Flux énergétique	Watt	W ou J/s ou N·m/s	1 kcal/h = 1,16 W

Les puissances de 10

Tableau 21 : Les puissances de 10

10 ¹⁸	10 ¹⁵	10 ¹²	10 ⁹	10 ⁶	10 ³	10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁹
E	P	T	G	M	k	m	μ	n
exa	péta	téra	giga	méga	kilo	milli	micro	nano



Equivalences simplifiées entre les combustibles

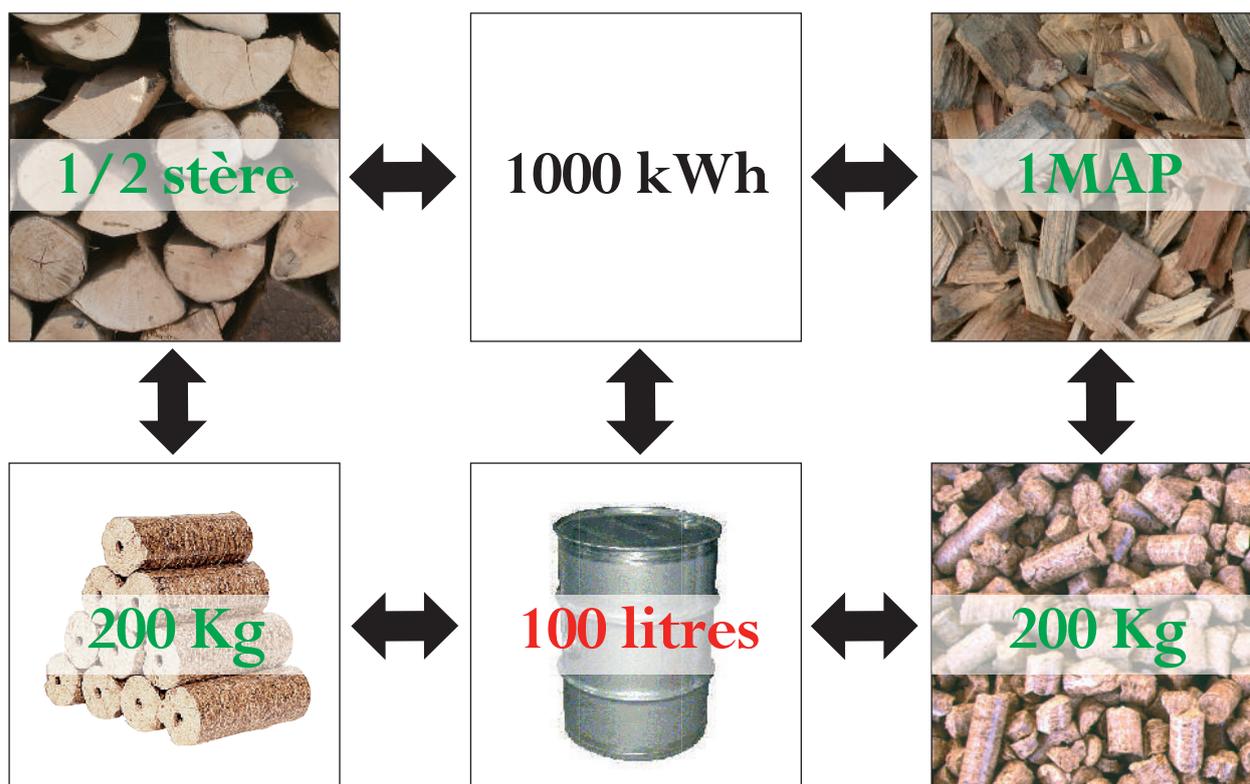


Schéma 36 : Equivalences simplifiées entre les combustibles

Equivalences des unités d'énergies

Tableau 22 : Equivalences des unités d'énergies

	KWh	kcal	Joule	TEP
KWh	1	860	$3,600 \times 10^6$	86×10^{-7}
Kcal	$1,16 \times 10^{-3}$	1	4 180	10^{-7}
Joule	$2,78 \times 10^{-5}$	239×10^{-6}	1	24×10^{-7}
TEP	11 610	10^7	$4,179 \times 10^4$	1

Equivalences moyennes du MAP et de la TEP

Tableau 23 : Equivalences moyennes du MAP et de la TEP

1 MAP de plaquettes =	1 tep = énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole moyen
330 kg plaquettes	42 GJ
0.5 m ³ plein bois	1163 l fioul
2/3 m ³ Stères	4500 kW électricité
220 kg granulés	3 t bois sec
500 kg écorces	1,5 t charbon
88 m ³ gaz naturel	13 000 kWh PCS gaz naturel
78 kg propane	0.91 t propane
100 l fioul	3.496 t paille sèche
1000 kWh	



Les conversions entre unités

Tableau 24 : Les conversions entre unités

1... équivaut à :	GJ	tep	MBtu	kWh	m ³ de gaz	Baril de pétrole
1 GJ	1	1/42 = 0,238	0,948	278	23,89	0,1751
1 tep	41,855	1	39,68	11 628	1 000	7,33
1 MBtu	1,0551	0,0252	1	293,1	25,2	0,185
1 kWh	0,0036	0,086 10 ⁻³	3,412 10 ⁻³	1	0,086	630,4 10 ⁻⁶
1 m³ de gaz *	0,041855	10 ⁻³	0,03968	11,628	1	7,33 10 ⁻³
1 Baril de pétrole *	5,7	0,1364	5,4	1 580	136,4	1

La tonne d'équivalent pétrole (tep) est une unité de mesure couramment utilisée par les économistes de l'énergie pour comparer les énergies entre elles.

Le Btu: British thermal unit.

Le m³ de gaz : les équivalences pour le m³ de gaz (ou normo-m³, aux conditions normales de température et de pression : 0°C, sous 1013 hPa, norme ISO; par opposition au m³ standard) sont données en énergie PCS (pouvoir calorifique supérieur). L'équivalent en énergie PCI (pouvoir calorifique inférieur) s'obtient en multipliant par 0,9. Le Term anglais, unité utilisée par la bourse de Londres pour la cotation du gaz NBP équivaut à : 29,31 kWh, soit 0,1 Mbtu.



LA COMMERCIALISATION DU BOIS-ÉNERGIE

Les combustibles bois se présentent sous différentes formes. Dans cette partie, les différentes caractéristiques décrivant les combustibles bois ne sont pas décrites car elles l'ont déjà été dans la partie « les propriétés des combustibles bois-énergie ».

Par contre seront développés les contrôles, les modes de commercialisations, les prix, la future norme européenne et la rédaction des contacts d'approvisionnement des chaufferies bois.

Le contrôle des paramètres

Etablissement d'un contrat de fourniture

Quel que soit le choix du mode de vente, il est nécessaire d'établir un contrat entre le fournisseur de combustible et l'acheteur afin de définir des caractéristiques de combustible adaptées à l'installation, ainsi que les marges de tolérances sur la qualité du combustible bois, les conditions de livraisons, le mode de facturation.

Quel que soit le contrat, la réception qualitative de la livraison est indispensable. Elle permet de contrôler rapidement si la livraison de combustible bois correspond au cahier des charges fixé entre le client et le fournisseur de bois et notamment de vérifier la qualité du combustible (corps étrangers, essence, granulométrie, humidité). Pour certaines méthodes de commercialisation, ce contrôle permet de vérifier que la quantité livrée correspond à la facturation.

Echantillonnage du combustible

Si le moyen de mesure peut être très précis, l'échantillonnage du combustible revêt quant à lui une grande importance, et plusieurs mesures s'avèrent nécessaires, soit au cours du temps,

soit sur plusieurs livraisons surtout si celles-ci sont hétérogènes. Il est nécessaire que le fournisseur et le client s'accordent sur un protocole d'échantillonnage, qui peut être intégré dans le cahier des charges.

Exemple d'échantillonnage pour la mesure d'un taux d'humidité de bois déchiqueté : pour obtenir un taux d'humidité reflétant la qualité de la livraison de combustible, il faut prélever trois échantillons pour une livraison de 30 m³ : au début, au centre et en fin du camion. Ensuite ces échantillons sont mélangés et l'analyse de l'humidité peut être alors effectuée.

Mesure de l'humidité du combustible bois

Comme vu précédemment, la connaissance de l'humidité du bois est indispensable pour déterminer le contenu énergétique de la livraison. Si elle peut être estimée suivant son origine et son parcours, il est nécessaire pour des livraisons importantes (plus de 30 m³) de la mesurer, notamment dans le cadre d'un contrat d'approvisionnement intégrant un cahier des charges précis sur l'approvisionnement. Elle peut alors être mesurée par plusieurs moyens recensés dans le tableau 24.

Tableau 25 : Mesure de l'humidité du combustible bois

Méthode	Coût moyen de l'appareil de mesure	Précision	Durée de la mesure	Avantage	Contrainte
Etuve - balance	1000 euros HTVA	Bonne	24 à 48 heures	Précision	Durée de la mesure - échantillon à 104°C jusqu'à stabilisation du poids de l'échantillon
Micro-ondes balance	300 euros HTVA	Moyenne	½ heure	Simplicité	Surveillance due au risque d'auto-inflammation. La mesure doit être effectuée trois fois pour un résultat correct.
Seau de mesure	2600 euros HTVA	Moyenne	5 minutes	Rapidité	Mesure correcte que dans des plages restreintes d'humidités et de granulométrie (plus la granulométrie est élevée, plus il sous estime l'humidité)

Les coûts moyens cités dans le tableau correspondent aux coûts de l'appareil de mesure.

Coût indicatif d'une mesure d'humidité effectuée par un laboratoire : 35€ par échantillon.

Tous les laboratoires, notamment agricoles sont équipés de moyens pour mesurer l'humidité.



Homogénéité du bois

La qualité du lot commercialisé doit être aussi homogène que possible en ce qui concerne les limitations techniques et économiques. Il faut veiller en particulier à ce que la teneur en eau soit homogène. L'acheteur et le vendeur devraient être d'accord quant aux variations acceptables de la teneur en eau d'un lot, ainsi que sur la proportion maximale de particules surdimensionnées et sur la limite des dimensions et du volume des morceaux les plus grands pour chaque installation et chaque lot si nécessaire. L'acheteur, le responsable de l'équipement et les producteurs de combustibles doivent prendre ces questions en compte dans le projet initial.

Les défauts du bois

Les assortiments et qualités du bois énergie sont composés de bois à l'état naturel, c'est à dire ni imprégné, ni revêtu d'une substance quelconque (colle, peinture, vernis, ...). Elle inclut notamment le bois sous forme de morceaux bruts, d'écorces, de bois déchiquetés, de sciures, de poussières de ponçage ou de chutes issues de l'industrie du bois, de sa transformation ou de son artisanat. Les méthodes de production, de stockage et de livraison du bois doivent éviter la contamination du lot par des cailloux, des éclats de métal, du plastique, de la neige, de la glace ou du bois gelé. Une pourriture rouge dure, pour les résineux et de légères échauffures pour les feuillus sont tolérées. Ne sont pas acceptable au prix convenu, tous bois pourris, friables, ainsi que les bois atteints de pourriture blanche. La pourriture est principalement à surveiller sur les écorces et les plaquettes résineuses.

Les modes de commercialisation du bois-énergie

À l'état anhydre, une tonne de bois fournit quasiment toujours la même quantité d'énergie. Mais le bois peut se trouver sous différentes formes et différents états. Trois facteurs fondamentaux font varier sensiblement la disponibilité énergétique d'un chargement : l'humidité, l'état du combustible (sciure, copeau, plaquette, granulés, etc.) et la masse volumique du bois.

La commercialisation pour le marché domestique

Les combustibles bois concernés par cette catégorie sont :

- Les bûches massives
- Le bois déchiqueté
- Le granulé en vrac
- Les granulés en sac
- Les bûches compactées

Nous ne traiterons ici que les combustibles d'origine agricole et

forestière (en opposition des combustibles issus de l'industrie), c'est-à-dire les bûches massives et le bois déchiqueté et les granulés. Les différents modes de vente sont expliqués ci-dessous.

La commercialisation au volume

• Les bûches :

L'unité de vente, la plus utilisée en France est le volume apparent: le stère. Le stère est l'équivalent d'un cube de bûches de 1 mètre de côté. Les autres unités non métriques sont à proscrire, car elles ne sont pas uniformes suivant les régions. Lorsque les bûches sont en 1 mètre, la quantité livrée est aisée à évaluer, il suffit de connaître la longueur et la hauteur du tas.

En revanche, le volume occupé par des bûches coupées en 50, 33 ou 25 cm n'occupe pas le même volume. Les tableaux 25 et 26 donne les correspondances du stère pour des bûches de 1 mètre, 50 cm et 33 cm.

Tableau 26 : Correspondances du stère

CONVERSIONS Valeur en m ³	Bois plein	Bûches 1 m	Bûches 50 cm	Bûches 33 cm
Bois plein	1	1.4	1.35	1.2
Bûches 1 m	0.67	1	0,9	0.79
Bûches 50 cm	0.74	1.11	1	0.9
Bûches 33 cm	0.83	1.24	1.12	1

Tableau 27 : Correspondances du stère en France et en Allemagne

Variations du stère à la recoupe en m ³	Bûches 1 m	Bûches 50 cm	Bûches 33 cm
Chiffres du CTBA (France)	1	0,8	0,7
Chiffres en Allemagne	1	0,9	0,79



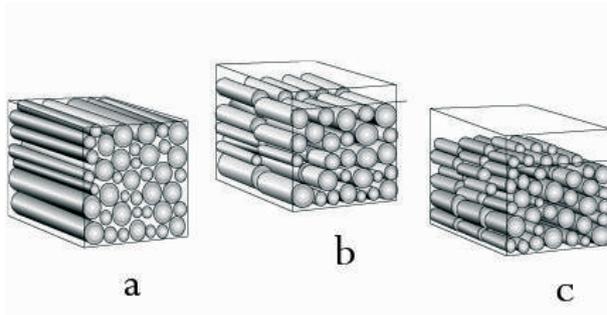


Schéma 37 : Cubage du bois de chauffage

Le stère initial en bûches de 1 mètre de longueur occupe par définition un volume apparent de 1 m³(a). En France, il n'occupe plus que 0,8 m³ en moyenne une fois que les bûches sont recoupées en 0,5 m de longueur (b) et plus que 0,7m³ si les bûches sont recoupées en 0,33 m (c). L'explication de ce phénomène est que le rangement est plus efficace lorsque les bûches sont plus courtes, car elles laissent une quantité de vide moindre. Les stères peuvent se présenter aussi en fagots ronds. Ces équivalences permettent d'établir le volume vendu et la facturation s'ensuivant.

Le stère est critiqué à cause des ambiguïtés qu'il peut provoquer car le volume apparent contenu ne reflète pas le contenu énergétique qui est plutôt lié à la masse. En effet la masse effective d'un stère varie selon l'essence, le diamètre, le façonnage, et la rectitude des bûches. Les différences observées suite à la recoupe entre France et Allemagne en sont témoins, Celles-ci proviennent en l'occurrence des types de bois utilisés, avec notamment peu de chêne tordu en Allemagne.

La conclusion est que le stère est inévitablement une unité imprécise. Pour compléter la vente au volume, il est opportun d'indiquer le contenu énergétique soit unitaire soit de la livraison afin de mieux renseigner le client. Dans d'autres pays, comme l'Italie, le bois de chauffage est mesuré au poids, ce qui est considéré par quelques-uns comme plus adéquat si toutefois l'humidité est bien vérifiée.

• Le bois déchiqueté:

Pour un même volume, l'humidité et le volume de vide du à l'empilement du combustible peuvent varier fortement, donc le contenu énergétique de la livraison aussi. Afin de prendre en compte ce volume de vide du à l'empilement, la facture se fait soit en MAP soit en incluant un coefficient de foisonnement du combustible livré dans le calcul du volume.

La vérification de la quantité livrée se fait de visu : contrôle du véhicule ou repères dans le stockage.

L'unité de mesure du volume est le mètre cube apparent (MAP) pour les bois déchiquetés ou broyés. Le MAP occupe par définition un volume apparent de 1 m³. Son humidité doit toujours être indiquée, des mesures physiques sont nécessaires pour la vérifier.

La vente au volume est intéressante pour du produit connu (essence, granulométrie), pour les filières courtes sans intermédiaires (agriculteurs, scieries). Elle s'avère correcte quand il s'agit de combustible sec et bien calibré. En général c'est le cas lorsqu'il s'agit de petites quantités. Le pouvoir calorifique volumique des combustibles bois variant peu avec leur taux d'humidité, le contenu énergétique des différentes livraisons sera quasiment identique.

En revanche, il faut savoir que lors des transports un tassement des plaquettes se produit, ce qui rend l'évaluation du volume plus difficile. Le principale avantage est qu'il est aisé de déterminer le volume, l'inconvénient majeur est la grande insécurité sur le contenu énergétique.

Pour des facturations au volume, il existe deux méthodes de calcul :

- Le volume de la benne est mesuré en prenant pour hauteur de référence la hauteur moyenne de remplissage.
- Le volume est calculé après avoir mesuré la masse et la masse volumique (en précisant l'humidité, car elle varie avec cette dernière, on peut exprimer la masse volumique en fonction d'une humidité de référence) du produit.

Pour cette méthode, le contenu énergétique est connu précisément. Par contre, elle a pour inconvénient de mesurer la masse et la masse volumique du produit.

La commercialisation au poids

C'est toujours le cas des combustibles de bois compressés. Ils sont vendus le plus souvent au kg ou à la tonne lorsqu'il s'agit de plus grandes quantités.

Lorsque ces combustibles sont conditionnés en sacs, ou en cartons, il est utile d'étiqueter le lot en indiquant le poids et le prix unitaire au kg.

Dans l'un ou l'autre cas, il est intéressant de mentionner le contenu énergétique du combustible soit sur la facture soit sur l'étiquette.

La commercialisation pour le secteur industriel & collectif

Les combustibles bois concernés par ces marchés sont

- Le bois déchiqueté forestier,
- Le bois déchiqueté d'industrie,
- Le bois de rebut déchiqueté,
- Les écorces broyées,
- Les granulés en vrac.

Nous ne traiterons ici que les combustibles d'origine agricole et forestière (en opposition des combustibles issus de l'industrie), c'est-à-dire le bois déchiqueté forestier, les écorces broyées et les granulés en vrac.



Les modes de vente de ces différents combustibles sont les suivants :

La commercialisation au poids

L'unité de mesure du poids est la tonne. La vérification de la quantité livrée se fait avec le ticket de pesée. L'humidité du combustible doit toujours être indiquée, des mesures physiques sont nécessaires. Le poids d'une livraison permet d'établir un bon rapport avec le pouvoir calorifique.

Etant donné que le pouvoir calorifique massique des combustibles bois varie beaucoup avec leur humidité, le contenu énergétique des livraisons selon leur poids pourra être très variable. En effet, un combustible humide sera plus lourd donc facturé plus cher (si l'humidité n'est pas mesurée) en revanche, la quantité d'énergie récupérée ne sera pas plus élevée.

Ce mode de commercialisation n'est donc pas recommandé pour des combustibles dont l'humidité varie sauf si une mesure d'humidité vient compléter la pesée (voir partie Commercialisation sur la base du contenu énergétique). Si ces deux mesures sont réalisées la facturation au poids est plus précise que la facturation au volume, car le type de combustible et la masse volumique ne jouent aucun rôle.

Les avantages sont l'indépendance par rapport au type de combustible et à la masse volumique, ainsi que la précision élevée du contenu énergétique. L'inconvénient est la nécessité de mesurer la masse et l'humidité.

Commercialisation au volume

Pour le bois déchiqueté vendu au volume dans le cas d'installations industriels & collectives, se reporter à la partie "La commercialisation au volume" et au paragraphe "Le bois déchiqueté."

Commercialisation sur la base du contenu énergétique

Pour mieux assimiler les combustibles bois à une énergie, il est recommandé de vendre le bois selon son contenu énergétique. Deux configurations sont possibles :

• Commercialisation de l'énergie fournie entrée chaudière (en MWh)

Le contenu énergétique du bois peut également être estimé à l'entrée de la chaudière. Ne pouvant mesurer directement la quantité de kWh (kilowatt heure) que représente une livraison de combustible bois, on y parvient indirectement en mesurant la masse et en contrôlant par prélèvement la teneur en eau. Grâce à ces données, on peut calculer l'équivalent de la livraison en kWh à partir des PCI moyens de bois sec par essence.

Pour ce mode de vente, le coût de l'énergie en entrée chaudière est calculé par la formule suivante :

$$\text{Valeur de l'énergie} = \text{tonnage livré} \times \text{PCI en kWh/t} \times \text{prix convenu pour le kWh}$$

La méthode de calcul fait intervenir la formule suivante :

$$\text{PCI} = \frac{\text{PCI}_0 \times (100 - \text{Hpb})}{100} - 0,006 \times \text{Hpb}$$

PCI, pouvoir calorifique inférieur réel du combustible en kWh/t

Hpb, humidité sur poids brut en %

PCI₀, pouvoir calorifique inférieur du bois à l'état anhydre en kWh/t

$$\text{Hps} = \frac{100 \times \text{Hpb}}{100 - \text{Hpb}}$$

Comme il n'existe pas de moyen simple pour mesurer rapidement le PCI pour chaque livraison, le PCI est estimé.

Tableau 28 : Commercialisation de l'énergie fournie en entrée chaudière

Mode de vente	Avantages pour le fournisseur F+ ou l'acheteur A+		Contraintes pour le fournisseur F- ou l'acheteur A-	
Entrée chaudière	Un mode de vente largement pratiqué.	F+ A+	Nécessité de mesures de poids et humidité systématique.	A-
	Connaissance immédiate des caractéristiques de chaque livraison. Permet une rapidité de réaction des deux côtés.	F+ A+	Besoin de confirmations ponctuelles du PCI véritable.	A-
	Mode compatible avec plusieurs fournisseurs. Grande souplesse d'évolution des approvisionnements	A+		



• **Commercialisation de l'énergie produite sortie chaudière (en MWh)**

La facturation du combustible livré se fait sur la base de la quantité de chaleur produite par la chaufferie bois*, relevée avec un compteur de chaleur qui mesure l'énergie utile produite. L'énergie utile résulte du contenu énergétique du combustible livré et du rendement global de l'installation*.

Dans ce cas, la facture est réalisée en fonction de l'énergie mesurée par le compteur de chaleur, et la facturation est faite selon la formule suivante:

$$\text{Valeur de l'énergie} = \text{énergie mesurée au compteur « sortie chaudière»} \times \text{prix convenu pour le kWh*}$$

* Prix convenu = prix PCI convenu x rendement convenu de la chaudière.

Cette formule peut être assortie d'une garantie de «rendement chaudière» de la part de l'exploitant étant donné que celui-ci fait partie de la détermination du prix du kWh.

La commercialisation des combustibles précédents hormis des granulés peut se faire en mélange. Dans ce cas, il est préférable de vendre le combustible relativement à son contenu énergétique pour ne pas avoir à faire une facturation multiple.

Tableau 29 : Commercialisation de l'énergie produite en sortie de chaudière

Mode de vente	Avantages pour le fournisseur F+ ou l'acheteur A+		Contraintes pour le fournisseur F- ou l'acheteur A-	
Sortie chaudière	Pas de mesures à la livraison	F+ A+	Non maîtrise par le fournisseur du rendement de la chaudière	F-
	Facturation aisée	F+ A+	Limitation à un seul fournisseur	A-
	Un seul fournisseur Simplification des relations commerciales.	A+	Risques de déviations des compteurs de chaleur, si des ré-étalonnages réguliers ne sont pas réalisés.	F-
	Mode de vente innovant pour le client	A+	Image de contrainte pour les professionnels, démarque le bois par rapport aux autres énergies	F-

Le prix

Généralités

Le coût du bois livré est calculé par rapport à la masse ou au volume suivant le type du combustible et le transport utilisé. Ce coût est la somme de toutes les opérations effectuées pour la mise à disposition du bois chez l'utilisateur : fabrication (déchiquetage, séchage, fendage, etc.), transport, stockage, livraison chez le client.

D'une manière générale, plus un combustible est grossier et humide, moins il est cher, mais plus il impose de contraintes techniques pour son transport, son stockage, ou son utilisation en chaufferie.

Cette formule peut être assortie d'une garantie de «rendement chaudière» de la part de l'exploitant étant donné que celui-ci fait

partie de la détermination du prix du kWh.

Une bonne maîtrise des coûts d'exploitation passe par une évaluation juste des coûts d'entretien, des risques de pannes, et dans le doute, il vaut mieux préférer les combustibles chers. Cependant, plus la consommation est grande, plus la prise de risque peut s'avérer intéressante si le prix d'achat est vraiment bas et garanti dans le temps.

Le taux de TVA intervenant également dans le prix du combustible, il est intéressant de noter que pour la France, le taux applicable en 2004 aux combustibles bois lorsqu'ils sont directement vendus à l'utilisateur final est un taux réduit à 5,5%. Dès le moment où il y a revente de chaleur, le taux de TVA passe à 19,6%. (Se reporter pour plus de précisions au Bulletin officiel des impôts du 31 mars 1998).



Prix du combustibles bois

Le tableau suivant présente des prix moyens de différents combustibles bois recueillis en 2006 par l'ITEBE auprès de producteurs de combustibles et de chaufferies collectives sur toute la France. Il s'agit d'une estimation car aucune étude n'a été réalisée pour 2006.

Marché collectif et tertiaire	
Combustibles	Prix en €/MWh HT
Ecorces	9
Bois de rebut	7 à 13
Plaquettes d'industrie	11 à 17
Plaquettes forestières	16 à 25
Gaz Naturel STS	19,8
Charbon (déc. 2004)	9,2
Granulés en vrac	25 à 36
Fuel domestique	25
Fioul lourd	23,5
Gaz Naturel B2s	29,8
Electricité - longues utilisations	89

Marché domestique Chauffage central	
Combustibles	Prix en c €/kWh TTC
Bois déchiqueté	1,5 à 3
Bois bûche	2,4 à 4,8
Granulés en vrac	3,8 à 4,7
Fuel domestique	6,19
Gaz Naturel B2I	4,68
Gaz Naturel B1	4,85
Charbon	6,87
Gaz propane	10,63
Electricité double tarif	11,23

Marché domestique Appareils indépendants	
Combustibles	Prix en c €/kWh TTC
Bois bûche	2,4 à 4,8
Granulés en sacs	5,5 à 6,5
Bûche reconstituée	5,5 à 6,5
Gaz Naturel B0	8,37
Electricité Double Tarif	11,72
Gaz en bouteille	16

Chiffres ITEBE et Minefi 2006.



Photo 62 : Granulés de bois en sac



Présentation de la future classification européenne des combustibles biomasse

Ce paragraphe présente les paramètres de la classification issue des spécifications techniques de la future norme européenne sur les biocombustibles solides CENTC 335. La classification des combustibles est un des textes les plus avancés dans son élaboration puisqu'il a été soumis au vote d'approbation en 2004 et qu'il est depuis cette date en discussion.

Les tableaux ci-dessous reprennent trois paramètres primaires pour chacun des combustibles :

- la granulométrie
- l'humidité,
- le taux de cendres

Des paramètres secondaires pourront également être définis :

- la densité d'énergie.
- le taux de fines,
- la présence de corps étrangers,
- la présence de moisissure.

Ils ne sont pas inclus dans ce document.

L'origine des bois sera spécifiée :

- Plaquettes forestières (forêt et élagages)
- Connexes de l'industrie du bois
- Bois de rebut

Il devra également être mentionné la présence ou non de corps étrangers dans le combustible (cailloux, métaux).

M = Humidité (Moisture)

D = Diamètre (Diameter)

L = Longueur (Length)

P = Granulométrie (Particle size)

Nous ne traiterons ici que les combustibles d'origine agricole et forestière (en opposition des combustibles issus de l'industrie), c'est-à-dire le bois déchiqueté forestier, les écorces broyées et les bûches.

Bois déchiqueté par couteaux

Granulométrie - dimensions (en mm)		
> 80 % du poids	Longueur maxi (< 1%)	Classes
$3,15 \leq P \leq 16$	≤ 45	P16
$3,15 \leq P \leq 45$	≤ 63	P45
$3,15 \leq P \leq 63$	≤ 100	P63
$3,15 \leq P \leq 100$	≤ 200	P100

Humidité sur poids brut %	Classes
≤ 20	M20
≤ 30	M30
≤ 40	M40
≤ 55	M55
≤ 65	M65

Taux de cendres % teneur massique	Classes
$\leq 0,7$	A0,7
$\leq 1,5$	A1,5
≤ 3	A3
≤ 6	A6
≤ 10	A10

Les écorces

La future classification européenne ne parle pas de granulométrie pour les écorces, sciures et copeaux. Nous en introduisons une parce qu'elle est tout de même nécessaire même pour des chaudières de grandes puissances.

Granulométrie - dimensions (en mm)	
Longueur la plus courante en mm (> 80 % du poids)	Classes
≤ 60	P60
≤ 100	P100
≤ 200	P200+
> 200	P200+

Humidité sur poids brut %	Classes
≤ 40	M40
≤ 50	M50
≤ 60	M60
≤ 70	M70



les bûches

Granulométrie - dimensions (en mm)		
Diamètre maximum	Longueur	Classes
≤ 20	≤ 200	P200-
40 ≤ D ≤ 110	≤ 200	P200
40 ≤ D ≤ 110	≤ 250	P250
40 ≤ D ≤ 110	≤ 330	P330
60 ≤ D ≤ 200	≤ 500	P500
60 ≤ D ≤ 200	≤ 1000	P1000
	> 1000	P1000+

Humidité sur poids brut %	Classes
≤ 20	M20
≤ 40	M40
≤ 65	M65

Aucune recommandation n'est donnée par rapport au taux de cendres.

Rédaction des contrats d'approvisionnement des chaufferies bois

Caractéristiques du combustible

Nature

Cette clause n'est pas toujours présente dans les contrats, mais elle permet de poser les principales contraintes imposées et les tolérances acceptées par la chaufferie*.

C'est donc dans ce paragraphe que l'on précise :

- La nature du combustible (plaquettes, sciure, écorces, etc.)
- La provenance (forêt, industrie de transformation du bois, etc.)
- La composition (mélange ou non) en précisant sa nature (feuillus, résineux, écorces, sciure, etc.)
- La propreté du combustible (adjuvants, pierres, ferrailles, etc.)

Exemples :

- La fourniture sera constituée de sciure, d'écorces ou de plaquettes, ou bien de ces produits en alternance, ou bien d'un seul d'entre eux.
- Le fournisseur devra fournir exclusivement du bois propre constitué de sous produits d'industries de la transformation du bois (écorces, sciure, chutes). Il ne sera pas accepté de déchets bois tels que des panneaux de particules, palettes, caissoneries usagées...

Caractéristiques

Cette clause du contrat doit spécifier de manière exhaustive toutes les caractéristiques obligatoires que le combustible livré doit avoir. Bien évidemment, celles-ci dépendent du mode de facturation, des caractéristiques de la chaudière et de la nature même du combustible.

Exemple :

Si le mode de facturation se fait à la tonne, l'humidité doit être mesurée. Dans la clause des caractéristiques du combustible, le contrat doit indiquer

une humidité de référence et une humidité maximale au-delà de laquelle le combustible sera refusé.

Si la chaudière n'accepte que des plaquettes d'une certaine granulométrie*, il est nécessaire, ici, de définir les tailles maximale, minimale et moyenne des plaquettes.

Si le combustible est un mélange, chaque type de combustible doit être caractérisé qualitativement et quantitativement de façon précise.

Ci-après, une liste détaillée des différentes caractéristiques qualitatives des combustibles.

• Qualité

De manière générale les caractéristiques commencent avec les deux alinéas suivants

- Bois propre (sans adjuvant, traitement, etc.)
- Exempt de tout corps étranger (ferraille, pierres, terre, déchets, plastique, etc.) ou pourcentage maximal de matières inertes accepté.

L'humidité est définie comme suit :

- Le taux d'humidité (sur brut) de référence (exprimé en %)
- Le taux d'humidité (sur brut) maximal (exprimé en %)
- Le taux d'humidité (sur brut) minimal (exprimé en %)

Parfois, le contrat ajoute des précisions sur l'humidité, telles que celles-ci :

- Le taux d'humidité moyen pendant les mois de saison de chauffe (exprimé en %)
- Le taux d'humidité moyen pour chaque livraison (exprimé en %)



Suivant les modes de facturation, le contrat stipule des valeurs pour

- La masse volumique moyenne en kg/m^3
- Le PCI ; Pouvoir calorifique inférieur moyen en KWh/tonne

Lorsque la livraison concerne des plaquettes, les grandeurs suivantes doivent apparaître :

- La granulométrie : dimensions moyennes, minimales et maximales (exprimées en $\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$), tout en précisant les proportions acceptables pour chacune des dimensions.

Exemple : Granulométrie

Dimensions minimales : $20 \times 10 \times 2 \text{ mm}$ (part : 5%)

Dimensions moyennes comprises entre $25 \times 15 \times 3 \text{ mm}$ et $35 \times 25 \times 7 \text{ mm}$

Dimensions maximales : $50 \times 30 \times 10 \text{ mm}$ (part : 5%)

- Le pourcentage maximal de queues de déchetage*. Ces impuretés gênantes pouvant être source de dysfonctionnements, vous pouvez demander à les éliminer totalement. Si votre fournisseur ne peut pas vous le garantir, il faudra définir avec soin un pourcentage maximal toléré.

D'autres caractéristiques peuvent être fixées dans le contrat

- Le pourcentage maximal de « fines » (particules traversant un tamis de mailles rondes d'1mm de diamètre).
- Le taux de cendres

Dans cette clause viennent se greffer des références à d'autres clauses.

Exemple : La mesure et le contrôle des caractéristiques du combustible sont précisés à l'article X.

Tout dégat ou problème liés au non-respect des caractéristiques du combustible pourra entraîner un laisser pour compte de la marchandise ou une résiliation du contrat, dans le cas où le combustible est jugé non conforme, comme prévu à l'article Y.

En tant que client, vous devez donc demander à votre fournisseur de chaudière les types et caractéristiques des combustibles qu'elle peut accepter.

• Quantité

Le contrat doit stipuler les quantités contractuelles limites de l'engagement entre le fournisseur et le client. Celles-ci peuvent s'exprimer en tonnes, MAP, m^3 , kWh ou MWh et doivent être évaluées pour un besoin annuel.

Exemple : Le consommateur de combustible s'engage à acheter du bois de chauffage pour une production de chaleur $> 120\,000 \text{ kWh}$ par année...

Vous pouvez préciser dans un tableau une répartition prévisionnelle, sur l'année, des consommations de bois en précisant son caractère contractuel ou non.

Exemple : pour une facturation à la tonne

La répartition prévisionnelle, sur l'année, des consommations de bois n'est pas contractuelle ; elle est donnée à titre indicatif.

Les modes de contrôle et de suivi de la qualité et de la quantité du combustible livré

Dans cette clause du contrat, vous pouvez commencer par les quelques précisions suivantes :

- Tout contrôle doit se faire lors de la livraison, avant l'entrée dans le silo ou sur l'aire de stockage (hangar plate-forme, etc.).
- Les contrôles sont à la charge du fournisseur (ou du client).
- Un représentant du client peut être amené à effectuer des contrôles inopinés à la réception de l'approvisionnement.

Mais il faut surtout noter que c'est à ce moment que s'opère le transfert de propriété de la marchandise.

Pour la qualité

Le contrat doit stipuler si le laboratoire d'analyse est laissé au choix du fournisseur ou du client, ou préciser celui qui a été déterminé par un accord entre les deux parties (les coordonnées du laboratoire doivent être communiquées aux deux parties.). Puis, il impose une fréquence des analyses durant la saison de chauffe (des analyses supplémentaires en début de saison sont parfois nécessaires).

Les mesures peuvent être définies contractuellement (les modes d'échantillonnage, de pesée, etc.). Par exemple, l'humidité peut être définie mensuellement par la moyenne des prises d'échantillons sur les camions de livraison. Cependant, les différentes méthodes sont souvent imposées par le laboratoire d'analyse que les deux parties ont choisi. La contractualisation devient nécessaire si l'une ou l'autre partie veut imposer une méthode particulière.

Exemple : La mesure du PCI et de l'humidité est à la charge du fournisseur. Elle sera effectuée dans le laboratoire de son choix.

Toutefois, les dates de mesure, ainsi que le nom du laboratoire concerné seront communiqués au client.

Il sera effectué une mesure au moins pour x MAP de produit par an. Le client se réserve la possibilité de faire effectuer, à ses frais, des mesures contradictoires par un laboratoire de son choix.

Pour la quantité

Le contrôle de pesée sur les livraisons doit être contractualisé. Ainsi, le contrat doit définir les informations que doit contenir le bon de livraison et tous les documents qui y seront joints et remis au moment de la livraison (ticket de bascule, poids utile du chargement, la quantité livrée par type de produit exprimée en tonnes ou le volume exact du chargement en MAP ou m^3 .) afin d'optimiser le contrôle, ainsi que la(ou les) personne(s) habilitée(s) à le signer.

Exemple : A chaque livraison, le fournisseur remet un bon de livraison au représentant du client. Sur ce bon sont indiqués : la date de livraison, le(s) produit(s) livré(s), la quantité livrée par type de produit, exprimée en tonnes, le ticket bascule.

Voici un paragraphe à ajouter lors d'une mesure du volume du combustible livré :

Le volume déclaré par le fournisseur ne pourra pas dépasser de plus de 5%



le volume reconnu à l'arrivée afin de tenir compte du tassement durant le transport.

Description des procédures à suivre pour les livraisons

Commandes des livraisons

Cette clause définit les délais, les horaires et modes de déclenchement des livraisons.

Exemple : La livraison s'effectuera, pour un appel téléphonique donné avant 12 heures, au plus tard le lendemain avant 17 heures.

C'est aussi dans cette clause du contrat que le client doit préciser les conséquences en cas d'une livraison défectueuse ou absente et les droits qu'il se réserve pour y pallier, en n'omettant pas de faire référence à la clause sur les pénalités au cas où le retard de livraison n'est pas rattrapé dans un temps qui doit être contractualisé.

Exemple : En cas de non-livraison ou d'insuffisance de livraison, le client avisera par téléphone le fournisseur et confirmera par lettre recommandée avec accusé de réception. Si les livraisons n'ont pas repris jours après la lettre recommandée avec accusé de réception, le client se réserve le droit d'exercer sa faculté de remplacement et de passer commande à un autre fournisseur. En outre, le fournisseur devra subir les pénalités définies à l'article X sans pouvoir formuler à l'encontre du client une quelconque réclamation.

Programmes des livraisons

Le contrat fixe dans ce paragraphe une date à laquelle sera déterminé le plan prévisionnel des cadences des livraisons pour les douze mois à venir. Les conditions de modification de ce planning doivent être contractualisées.

Exemple : Ce planning ne pourra être modifié que par appel téléphonique du client (confirmation de l'appel par lettre recommandée avec accusé de réception) ou par l'expédition d'un nouveau planning de livraison par lettre recommandée.

Contractualiser les engagements du fournisseur et du client en cas d'amenuisement plus rapide que prévu du stock de combustible et en cas de surabondance momentanée.

Exemple : En cas de consommation plus rapide que prévue du stock conservé en silo, le fournisseur s'engage à livrer les quantités supplémentaires demandées sur appel téléphonique du client, avec confirmation écrite de cette demande le même jour par lettre

Ceci étant précisé, le fournisseur ne pourra être tenu responsable d'un manque de combustible si la consommation dépasse de 50% la quantité journalière moyenne prévue pour le mois considéré. . .

Conditions des livraisons

Le contrat doit comporter dans cette clause, le lieu de livraison, le temps de chargement ou de bennage si nécessaire, si

la livraison se fait dans un silo, une plate-forme de stockage ou un hangar et à qui incombe les frais de livraison.

S'il y a chargement ou remplissage, le contrat doit préciser qui prend en charge les frais, qui assure la facilité d'accès et qui assure les opérations de déchargement des véhicules.

Si des raisons techniques l'imposent, il faut spécifier le type de véhicule employé pour les livraisons : camion benne, remorques-bennes agricoles, camion à fond mouvant, etc.

Préciser que : Le fournisseur a du prendre connaissance complète du terrain et de ses abords, ainsi que des conditions d'accès et des possibilités de desserte en voiries et de tous les éléments généraux ou locaux en relation avec la prestation qu'il doit assurer au titre du présent marché.

Etablissement et indexation du prix et mode de facturation

La fourniture est réglée sur la base d'un prix unitaire hors TVA soit au m³ apparent plaquette (MAP), soit à la tonne de produit livré en vrac, soit au kWh entrée ou sortie chaudière. Le contrat doit indiquer le montant HT et le taux de TVA et si le prix HT est franco ou non. Les deux parties doivent se mettre d'accord sur une date à laquelle le prix de base de chaque combustible livré est révisé chaque année. Par exemple en début de saison de chauffe.

$$P = P_0 \left(0,5 \frac{I}{I_0} + 0,5 \frac{IPE}{IPE_0} \right)$$

P = prix résultant de la formule de la révision de prix

P₀ = prix de base fixé dans le présent document

I = indice du coût de la vie publié par l'INSEE

IPE = indice des Produits Énergétiques publiés mensuellement et qui représente une référence de la parité de toutes les énergies

Ne pas oublier de préciser les valeurs de I₀ et IPE₀ valables à la première livraison.

Pour une facturation à la tonne

Préciser le prix à la tonne pour chaque type de produit en ajoutant des conditions sur le taux d'humidité moyen, la masse volumique ou le pouvoir calorifique (PCI en kWh/t) suivant les contrôles prévus dans le contrat.

Exemple : Le prix est fixé à X € la tonne de plaquettes pour un PCI moyen de 3000 kWh/t et une masse volumique maximum de 300 kg/m³

Les prix seront révisés mensuellement en fonction du PCI moyen et des quantités livrées.

Exemple : pour une livraison de 30 tonnes de plaquettes pour un PCI de 3050 kWh/t.

$$\text{Prix forfaitaire} = \frac{30 \text{ tonnes} \times 3050}{3000} \times \text{Prix contractuel}$$



Pour une facturation au volume

La facturation se fait en €/MAP ou en €/m³ en calculant le volume (voir paragraphe Les principes de fourniture - achat au volume)

Pour une facturation de la quantité de chaleur entrée chaudière

Le prix de base est fixé à X €/kWh HT d'énergie fourni.

Pour une facturation de la quantité de chaleur sortie chaudière

Le prix est fixé à X €/kWh ou MWh de chaleur produite par la ou les chaudières à bois, avec un rendement annuel de l'installation compris entre X% et Y%

La facturation du combustible livré se fait sur la base de la quantité de chaleur produite relevée avec un compteur de chaleur.

La quantité de chaleur produite est payée conformément au prix du combustible et aux délais fixés dans le contrat.

Lorsque les conditions d'exploitation connaissent un changement important, il faut recalculer le rendement thermique des installations de chauffage à bois.

Exemple : Si le nouveau rendement annuel calculé varie de plus ou moins 2% par rapport au rendement fixé, le prix du combustible sera adapté en conséquence. Le rendement annuel de l'installation est recalculé précisément sur la base des données d'exploitation suivantes, relevées une fois par semaine sur la chaudière à bois.

- Durée d'exploitation de la chaudière pour les plages de puissance inférieure et supérieure à 60% de la puissance nominale.
- Durée de fonctionnement.
- Durée de fonctionnement - durée d'exploitation = entretien du lit de braises.
- Excédent d'air, température des gaz de fumée à la puissance donnée et avec la combustion donnée (y compris indication approximative de la teneur en eau).

Conditions de paiement

Le contrat doit fixer la devise, le ou les modes de paiement (chèque, carte bancaire, virement, prélèvement), ainsi que le moment (à la livraison, délai, date) et le lieu du paiement du client au fournisseur.

Procédures de rétorsion, cas de litiges, pénalités...

Pénalités de retard pour défaut de combustible ou pour pannes dues à cette fourniture

En cas de non-respect des délais de livraison par le fournisseur, les pénalités sont calculées par l'application de la formule suivante :

$$P = \frac{V \times R}{500}$$

P est le montant de la pénalité.

V est la valeur de l'ensemble du marché annuel de fourniture de combustible en €.

R est le retard d'exécution pour la livraison, retard exprimé en jours calendaires, c'est à dire : samedis, dimanches et jours fériés inclus.

Formule à inclure dans le contrat surtout si celle-ci permet le calcul des pénalités en cas de panne entraînée par le non-respect des caractéristiques de la fourniture.

Le contrat doit prévoir ce qui se passe lorsqu'un ou plusieurs jours fériés sont compris dans les retards de livraison.

Exemple : Lorsque le retard d'exécution pour la livraison comprend un jour férié, 24 heures de pénalité sont neutralisées dans le décompte de la pénalité.

Le contrat définit le mode d'imputation ou de règlement des pénalités.

Pénalités pour fourniture de combustible non conforme ou laissé pour compte

Cette clause est directement liée aux caractéristiques contrôlées lors de la livraison. Elle doit, précisée que le client à le choix entre accepter et refuser la marchandise (laisser pour compte) suivant les résultats des contrôles. Des limites au-delà desquelles le combustible ne sera pas accepté doivent être définies. Il faut aussi indiquer les pénalités sur le prix au cas où les caractéristiques constatées lors des opérations de contrôle se révèlent au-delà des limites de tolérance imposées par le client.

Exemple : Si le taux d'humidité constaté lors des opérations de contrôle effectuées dans les conditions définies à l'article X se révèle compris entre 50 et 65 %, le prix subira une réfaction de 4% par degré supplémentaire à 50%, puis une réfaction de 6% par degré supplémentaire si le taux d'humidité dépasse 65%.

Prendre en compte le cas où la non conformité du combustible livré implique une détérioration du matériel. Cette dernière doit être prouvée. Si c'est le cas, le responsable doit effectuer les réparations nécessaires ou prendre en charge leur paiement. Le client peut préciser qu'au cas d'un trop grand nombre de corps étrangers (pierre, ferraille) la vidange du silo sera à la charge du fournisseur. Au cas où le fournisseur dénonce de manière anticipée le contrat, le client pourra percevoir une indemnité correspondant à un certain montant qu'il faut définir.

Procédure à suivre en cas d'erreur de mesure (facturation sortie chaudière)

Le contrat doit spécifier que le client peut vérifier les dispositifs de mesure à tout moment. Puis, il précise qui prend en charge les coûts en résultant. Souvent la charge en revient à la partie contractante que le résultat du contrôle désigne comme étant en tort.



Le contrat peut définir des plages d'erreur et les engagements des deux parties.

Exemple : Si la vérification du dispositif de mesure révèle un écart de plus de 5%, le fournisseur rectifie sa facturation pour la période sur laquelle l'erreur a portée, mais au maximum pour une année rétroactivement, à compter du jour où elle a été découverte.

Le contrat doit prévoir le cas où l'ampleur de l'erreur n'est pas déterminable et les conséquences pour les deux parties.

Pénalités pour retard de paiement des factures

En cas de retard de paiement, le contrat fixe le montant des intérêts dus par le client au fournisseur. Dans ce cas une mise en demeure est nécessaire pour en déclencher le cours mais le fournisseur doit préciser le point de départ où la dette commence à multiplier les intérêts moratoires.

Exemple : Tout retard de paiement du fait du client entraînerait de plein droit le paiement des intérêts moratoires, soit X% du montant de la facture par jours de retard, sans ouvrir cependant de droit à une résiliation éventuelle du marché

Force majeure

Une clause de force majeure peut être mise dans le contrat. Il faut alors préciser les cas considérés comme telle : tremblement de terre, explosion, raz-de-marée, inondation, etc.

Un paragraphe doit expliquer les conséquences pour la partie qui ne remplit pas les termes du contrat du fait d'une force majeure. Enfin, cette clause doit rappeler le moyen pour les deux parties d'invoquer la survenance d'une force majeure.

Transfert des risques et assurances

Les risques de la chose incombent au fournisseur jusqu'à la réception de la marchandise par le client.

Cependant les deux parties peuvent conventionnellement dissocier le transfert de la propriété des risques. En pratique, il est courant d'associer les risques à la livraison de la marchandise surtout lorsque cette livraison nécessite un transport.

De plus, les livraisons peuvent causer des accidents ou dommages à un tiers. Il est donc préférable que le contrat stipule que le fournisseur justifie d'une assurance dans ce sens.

Litiges

En cas de litiges ou de différends, le contrat précise par quelle voie ils seront traités. Le plus souvent, il s'agit d'un arbitrage à l'amiable mais dans le cas où aucun arrangement n'est possible, les deux parties conviennent d'une juridiction compétente.

Il est habituel d'ajouter que durant la première année, considérée comme un test, les parties se rencontreront aussi souvent que nécessaire.

Durée de contrat et procédure de renégociation

Durée et fin de contrat

Le présent contrat porte sur l'engagement du fournisseur à fournir du combustible bois dans les conditions définies aux articles X et Y du présent contrat, pour une durée de XXX années à compter de la date de signature du contrat.

Cette phrase suffit pour déterminer la durée du contrat et sa date de début. Bien entendu, les parties peuvent retarder l'exécution du contrat à une date différente de celle de la signature.

Les deux parties peuvent aussi choisir une durée de contrat déterminée, reconductible régulièrement ou non, tacitement ou expressément. La reconduction impliquant la contractualisation d'une date à laquelle les deux parties décident d'une reconduction du contrat.

Renégociation

Le contrat doit spécifier les modalités concernant des modifications éventuelles du contrat.

Exemple : Les signataires se réservent le droit de modifier tout ou partie de ce présent contrat, dès lors que l'objectif économique fondamental de l'opération n'est pas changé par les modifications apportées. Toute modification fera simplement l'objet d'un échange de lettres signées des deux parties.

L'ensemble des déterminations annuelles comme la fréquence des livraisons ou le volume des fournitures prévu doit aussi faire l'objet d'un accord écrit entre les deux parties.



ETUDES DE CAS

Dans cette partie, trois études de cas sont présentées. Vous trouvez en compléments dans l'unité 10 d'autres études présentant des projets bois énergie.

Le bois énergie dans l'agriculture: Exploitation agricole le Oberli La Chaux-de-Fonds

Localisation

Suisse, Canton de Neuchâtel

Type d'exploitation agricole

L'exploitation agricole présentée est une entreprise familiale typique de la chaîne du Jura. Il s'agit d'une exploitation de polyculture et d'élevage de montagne, avec pour activité principale la production laitière.

Description de la structure de l'exploitation :

- Forme juridique : Communauté d'exploitation
- Main d'œuvre : Père et fils
- Situation : La Joux-Perret 32a, La Chaux-de-Fonds, NE (alt. 1040m)
- Activité principale : Production laitière et élevage, production de bois de service
- Taille de l'élevage : Environ 57 unités de gros bétail
- Surface : Environ 100 ha, dont 17 ha de forêts
- Bâtiments : Ferme (bâtiments d'élevage, sale de traite) et locaux annexes (comprenant deux appartements, piscine, un local technique avec bureau et sanitaire, garage-atelier)
- Mécanisation : Véhicules agricoles d'une exploitation très bien mécanisée.

Objectifs

Un domaine agricole proche de l'indépendance énergétique. L'orientation vers l'utilisation du bois énergie vient d'une part d'un souci de valorisation de la ressource existante sur l'exploitation (ressource forestière et main d'œuvre), et d'autre part d'une volonté d'indépendance énergétique motivée par des raisons économiques.

L'extraction des propres ressources forestières par la main d'œuvre à disposition sur place, pendant la morte saison, permet la mise en valeur de sous-produits dont la commercialisation en bois de service est très peu intéressante.

Elle assure une autonomie complète dans la production d'une chaleur intégralement indigène et renouvelable. Celle-ci est principalement utilisée pour le chauffage de vastes locaux d'habitation et de travail (peu isolés du fait de leur ancienneté) et de l'eau sanitaire.

Historique

C'est la nécessité de changer l'ancienne chaufferie à mazout qui a lancé la réflexion. Un des éléments décisifs dans le choix du changement du système a été la chute des prix du bois de pâte, qui rendait inintéressante la vente d'une grande partie du bois produit.

Ainsi l'utilisation du bois comme source d'énergie est devenue intéressante d'un point de vue économique par la réduction des charges due à la consommation d'énergie et d'un point de vue pratique par le confort de production permis (ex. eau chaude en sale de traite).

La Production de Plaquettes

La production annuelle de plaquettes s'élève à 160 à 180 m³. Le bois provient essentiellement des 17 ha de forêts présent sur l'exploitation. Il s'agit principalement de sous-produits forestiers (cimes et branches), le bois de service étant écoulé sur le marché.

Etapes de la production de plaquettes forestières :

• Coupes, Débardage :

Les coupes ainsi que le débardage sont effectués par les agriculteurs à la morte saison et en fonction de leur disponibilité. Le bois est stocké en bordure de forêt jusqu'au déchiquetage.

• Déchiquetage :

Le chantier de déchiquetage est organisé une fois par année, en automne. Le bois amassé est déchiqueté sur place, en bordure de forêts. Ce travail est sous-traité à une entreprise spécialisée qui est suffisamment équipée pour réaliser cette tâche en une journée.

• Transports :

Le transport des plaquettes vers les silos est effectué directement par l'exploitant avec son propre matériel (tracteurs, remorques).

Installation de chauffage

- Chaudière HATA, installée en 1989, puissance 35 kW, foyer type volcan démarrage manuel,
- 1 Silo d'alimentation avec fond racler (70 m)





Photo 63 : Déchiquetage d'une cime résineuse (source: J.G Béguin)



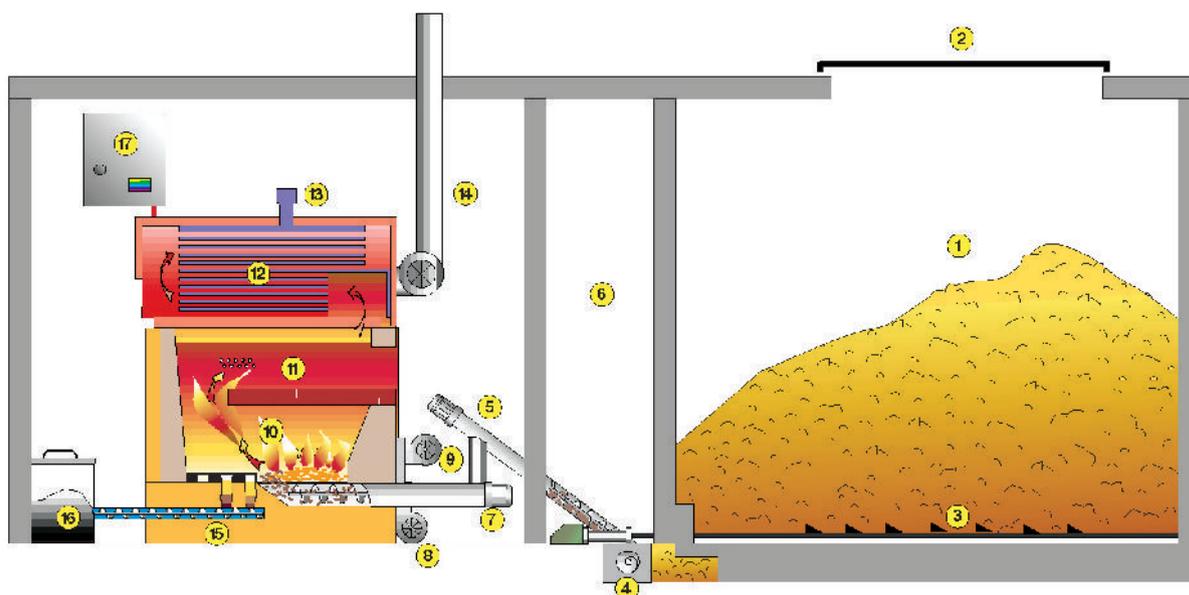
Photo 64 : Valorisation de matériel agricole (source: J.G Béguin)



Photo 65 : Utilisation de matériel agricole (source: J.G Béguin)

- 1 Silo d'appoint (120 m) un ancien silo à fourrage
- Utilisation du matériel agricole pour l'ensemble des manutentions (production de plaquettes, approvisionnement du silo d'alimentation)

Les locaux chauffés comprennent deux appartements, un local technique avec bureau et sanitaires ainsi qu'une partie d'un garage-atelier. La production d'eau chaude sanitaire (stockage de 300 litres, grande consommation notamment lors de la traite) ainsi qu'un apport au chauffage de la piscine en été sont également assurés par la chaufferie, qui fonctionne toute l'année.



1. Silo d'alimentation
2. Trappe coulissante d'accès au silo
3. Extracteur hydraulique
4. Convoyeur à vis en sortie de silo
5. Vis de transfert
6. Local technique

7. Vis d'alimentation
8. Ventilateur d'air primaire
9. Ventilation d'air secondaire
10. Chambre de combustion
11. Chambre de post-combustion
12. Echangeur de chaleur

13. Départ réseau de chaleur
14. Cheminée et extracteur de fumées
15. Vis de déchargement
16. Conteneur à cendres
17. Armoire de régulation

Schéma 38 : Principe de fonctionnement



Aspect économiques (chiffres de 2001)

- Investissement : pas d'investissements particuliers (matériel agricole à disposition).
- Investissements chaufferies et silos : inconnus.
- Frais d'approvisionnement :
 - Bois brute : 0€/m³ (propre forêts et utilisation de produits qui ne seraient pas valorisés)

- Débardage non comptabilisé
- Déchiquetage : 7€/m³
- Transport non comptabilisé (pas d'investissements dans du matériel et frais de fonctionnement négligeable)

Ainsi chaque année, la facture d'approvisionnement énergétique est de 1260€, ce chiffre varie en fonction des tarifs de déchiquetage.

PONTA Travaux Forestiers

Introduction

Dans cette étude de cas il ne s'agit pas d'une exploitation agricole. Cependant il reste très intéressant pour le monde agricole car de part sa dimension locale et ses investissements limités, il est facilement transposable à une exploitation.

Localisation

France, département du Jura

Structure de l'entreprise

- Forme juridique : entreprise unipersonnelle
- Equipements spécifiques à la production de plaquettes forestières :
 - Déchiqueteuse JEAN PAIN
 - Tracteur forestier
 - Benne agricole
 - Camion de capacité 15 m³
 - Hangar de stockage de 400m³

Historique : bois énergie comme nouveau débouché

PONTA travaux forestiers est une entreprise unipersonnelle mise en place depuis 1985. La première activité était l'abatage et le débardage de grumes toutes essences en longueur ou sciées. L'activité de production de bois énergie a pris de l'ampleur en 2002 avec l'acquisition d'une déchiqueteuse pour l'approvisionnement de particuliers et collectivités. L'entreprise a mis en place un hangar de stockage de 1 000 m³ et une aire de dépôt d'environ 8 000 m².

La Production de Plaquettes : valoriser les sous produits forestiers

La matière première provient de sous produits de l'exploitation forestière : éclaircies, plantations, houppiers, mais aussi l'entretien de près-bois et des haies. Les chantiers se déroulent sur une plate-forme d'environ 8 000 m². L'abatage manuel permet de récolter des grumes de toutes essences en différentes



Photo 66 : Production de plaquettes forestières

longueurs qui seront sorties par porteur (feuillus durs, feuillus tendres et résineux). Le déchiquetage se fait en forêt ou sous hangar. Les autres produits à déchiqueter sous forme de javelles sont initialement stockés puis broyés sous hangar. Les autres produits d'exploitation de faible valeur sont déchiquetés sur place en forêt. La déchiqueteuse a une capacité de 10 m³/heure et est alimentée par une grue. Les chaufferies n'ayant pas toutes les mêmes puissances, les plaquettes produites sont de dimensions variables calibrées entre 5×4×1 et 4×2×1 et présentent une humidité d'environ 35 %.

Les plaquettes sont ensuite stockées pendant trois mois minimum puis transporter par une benne agricole ou un camion de capacité 15 m³. Elles sont livrées entre 15 et 100 m³ à des particuliers et des collectivités pour alimenter des chaudières de 30 à 300 kW.



Photo 67 : Vue d'ensemble du hangar de stockage

Étapes de la production de plaquettes forestières

- Abattage manuel
- Façonnage sommaire
- Débardage par porteur
- Mis en tas bord de route
- Déchiquetage sous hangar
- Livraison par benne ou camion 15 m³





Photo 68: Stockage de plaquettes

Le contrat d'approvisionnement

En assurant à ses clients un approvisionnement régulier en combustible de haute qualité, M. PONTA est devenu un entrepreneur de chaleur. Les prestations de services aux collectivités et aux particuliers à négocier au cas par cas. La facturation est faite

dans le cadre de contrats territoriaux d'exploitation en fonction du volume de bois exploités et de la qualité des plaquettes produites. L'idéal est de broyer le produit vert, de le stocker sous abri pendant trois mois avant de le livrer chez le consommateur.

Avec l'acquisition d'une déchiqueteuse et la mise en place d'un hangar pour faciliter le stockage des plaquettes, un approvisionnement en combustible propre à chaque système peut être établi. Il sera basé sur un contrat d'approvisionnement avec des communes ou des collectivités de communes qui gèrent des installations importantes. L'aspect principal de ce type de prestation est la chaîne d'approvisionnement, le fournisseur, et les clients sont tous locaux, ce qui réduit les distances de transport des combustibles.

Aspects économiques

- Entreprise : PONTA Travaux Forestier
- Chiffre d'affaire : 27 000€ en 2003
- Chiffre d'affaire bois énergie : 11 000€
- Investissement : 46 000€
- Coûts de déchiquetage : 57 € HT/Heure
- Prix de vente de la plaquette : 20 € HT/m³

Andelot en Montagne: Le bois énergie pour valoriser son patrimoine naturel

Une petite chaufferie collective

Dans le petit village d'Angelot en Montagne, la forêt occupe une place importante dans le paysage et dans la vie de la population. Pour le groupement agricole (GAEC) Angonnet, le bois est une énergie qui doit être exploitée, utilisée et mise à profit, surtout lorsque ce potentiel énergétique est proche.

Le GAEC s'est d'ailleurs toujours chauffé au bois bûches, et son choix s'est tourné récemment vers une chaufferie automatique munie des derniers perfectionnements techniques.

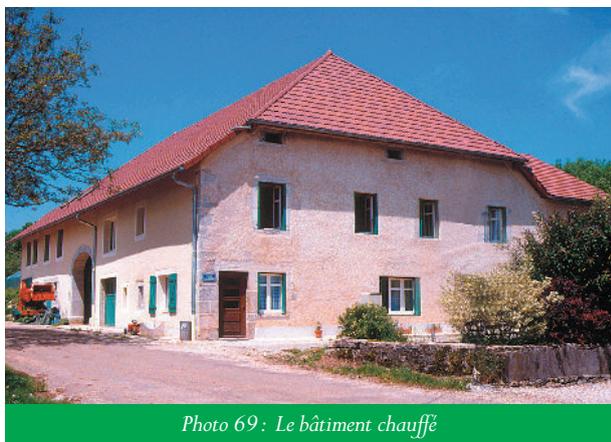


Photo 69: Le bâtiment chauffé

Cette chaufferie assure le chauffage de trois logements, d'un studio et d'un local agricole.

La présence de l'association d'insertion (SITE (Montmorot-39), qui possède une déchiqueteuse, offre la possibilité de la production de plaquettes forestières à partir de bois d'entretien des haies et des déchets forestiers.

Cette installation a été réalisée en 1998.

Caractéristiques de la commune

- Localisation : France, département du Jura
- Altitude : 630 m
- Population : 563 habitants
- Forêt: 435 ha

L'approvisionnement en combustible

Le combustible est principalement produit par les propriétaires qui attèlent la déchiqueteuse à leur tracteur et broyant les déchets de bois restant après certaines coupes. Ils s'alimentent également en plaquette industrielle livrée par un professionnel.

Leur consommation annuelle de bois déchiqueté est de 90 m³.

Le silo est équipé d'un fond rotatif de quatre mètres de diamètre à lames souples, pour le dessilage. Ensuite une vis d'extraction en acier, avec retour en arrière en cas de blocage, amène le combustible vers le foyer de la chaudière.





Photo 70 : La déchiqueteuse

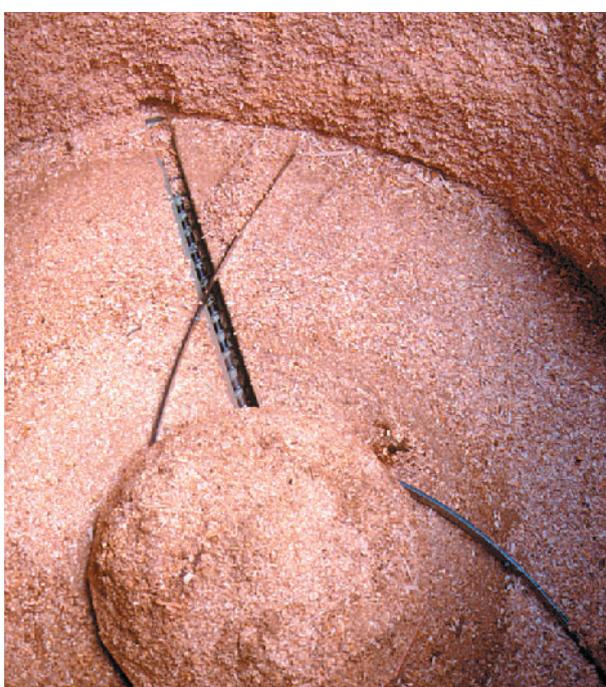


Photo 71 : Le dessileur rotatif

Une chaudière mixte bois bûches/bois déchiqueté

La chaudière choisie dispose d'un foyer volcan de marque Har-gassner et d'une puissance de 45 kW. La spécificité de cette chaudière est sa mixité; elle peut aussi bien brûler des bûches que du bois déchiqueté (humidité maximum de 35 %). En fait, le réfractaire de la chaudière s'arrête au niveau où l'on installe la grille pour la combustion des bûches, ainsi le risque que le réfractaire cède aux fortes variations de température est supprimé.

Pour la combustion des plaquettes, la chaudière possède un ventilateur d'air primaire pour la pyrolyse du bois et un ventilateur d'air secondaire assurant une parfaite combustion des gaz

(l'air secondaire étant préchauffé à travers la masse réfractaire). La combustion des bûches s'effectue quant à elle par tirage forcé, de manière inversée car la grille est placée au-dessus du réfractaire.



Photo 72 : La chaudière

Enfin la chaudière est équipée d'un allumage automatique qui lui permet de s'arrêter après une longue période de pause.

Le déchargement s'effectue également automatiquement à l'aide d'une grille mobile, puis une vis d'extraction amène les cendres vers un bac sur le devant de la chaudière.

Informations financières

- Maître d'ouvrage: GAEC Angonnet
- Coût global de l'investissement :
 - Matériel de chauffage: 24 803 € HT
 - Génie civil sur silo: 7 775€ HT
 - Coût total : 32 578 € HT
- Partenariat financier dans le cadre du plan bois énergie et développement local : Conseil général du Jura et ADEME Franche-comté (12%)



POUR EN SAVOIR PLUS

Visiter le portail du bois-énergie

Visiter le portail du bois-énergie

www.itebe.org

Espace tous publics

- Informations générales sur l'ensemble de la filière bois-énergie (Approvisionnements en combustibles bois, installations de chauffage au bois individuelles et collectives)
- Lettre électronique mensuelle ITEBE INFO,
- Annuaire des professionnels du bois-énergie,
- Librairie en ligne, forums thématiques, galerie photos, petites annonces, téléchargement de documents, répertoire de sites Internet sur le bois-énergie.

Espace professionnel

Plate-forme interactive d'échanges sur Internet pour la capitalisation et la diffusion des savoirs des professionnels, documents techniques, études, publications, événements et retours d'expérience sur la filière bois-énergie.

Les bonnes pratiques du bois-énergie

Série information

1. Mémento 2004 du bois-énergie
2. Chauffage domestique : choisir un chauffage à bois

Série outils

1. Répertoire des textes réglementaires relatifs au bois-énergie en France
2. Tableur pour l'usage des plaquettes forestières
3. Caractéristiques commerciales des combustibles bois

Série Les bonnes pratiques du bois bûche

1. Produire du bois de chauffage
2. Production de bois de chauffage et sécurité du travail
3. Concevoir une installation de chauffage central aux bûches

Série Les bonnes pratiques du bois déchiqueté

1. Produire de la plaquette forestière pour l'énergie
2. Production de plaquettes forestières et sécurité du travail
3. Aide à la rédaction des contrats d'approvisionnement des chaufferies bois
4. Concevoir une chaufferie automatique au bois déchiqueté de moins de 300 kW
5. Concevoir l'implantation d'un silo ou d'une trémie à bois déchiqueté
6. Envisager un réseau de chaleur au bois
7. La valorisation énergétique des bois de rebut

Liste des tableaux

Tableau 1 : Consommation d'énergie primaire provenant du bois-énergie dans les pays de l'Union européenne des 25 en 2004 (en Millions de TEP) [Source : EUROBSSEVER 2005]

Tableau 2 : Comparaison des temps de reconstitution pour le bois, le charbon et le pétrole [source EUROFOR, INESTENE]

Tableau 3 : Facteurs d'émissions pour le mazout, le gaz, des plaquettes de bois(hêtre) et des bûches (hêtre) en kg par TJ d'énergie utile (= mg/MJ d'énergie utile), selon l'étude n°315 de l'OFEFP (Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz).

Tableau 4 : Compositions moyennes des cendres de grille issues de la combustion de différents combustibles bois (Source : Hasler 1994, Ruckebauer 1995, Noger 1996)

Tableau 5 : Recommandations concernant les teneurs en métaux lourds (source : synthèse ITEBE, article 2004)

Tableau 6 : Part des énergies renouvelables dans la production de chaleur à partir de différents combustibles (sources : Valeur environnementale de l'énergie, 2000 ; Assessment of bioenergy system, 1999 ; Wood sustain, 2001 ; IEA, 1998)

Tableau 7 : Quantités de bois récoltable par type de travaux

[source ADEME AFOCEL]

Tableau 8 : Répartition des différents constituants du bois

Tableau 9 : Humidité du bois en fonction du PCI (ITEBE)

Tableau 10 : Variation du pouvoir calorifique en fonction de l'humidité (ITEBE)

Tableau 11 : Exemples de quelques PCI

Tableau 12 : Valeurs du contenu énergétique en fonction de l'essence et de l'humidité

Tableau 13 : Exemples de correspondance du stère pour du bois plein, bûches en 1m, 50 cm, 33 cm

Tableau 14 : Influence de l'humidité sur le pouvoir calorifique

Tableau 15 : Les propriétés du granulé de bois

Tableau 16 : Besoins d'énergie

Tableau 17 : Critères pour le choix d'une chaudière à bois

Tableau 18 : Comparatif des appareils de chauffage domestique

Tableau 19 : Récapitulatif des caractéristiques des appareils

Tableau 20 : Les unités

Tableau 21 : Les puissances de 10

Tableau 22 : Equivalences des unités d'énergies



Tableau 23 : Equivalences moyennes du MAP et de la TEP

Tableau 24 : Les conversions entre unités

Tableau 25 : Mesure de l'humidité du combustible bois

Tableau 26 : Correspondances du stère

Tableau 27 : Correspondances du stère en France et en Allemagne

Tableau 28 : Commercialisation de l'énergie fournie en entrée chaudière

Tableau 29 : Commercialisation de l'énergie produite en sortie de chaudière.

Liste des photos

Photo 1 : Plaquette forestière

Photo 2 : Bûches

Photo 3 : Granulés en sac

Photo 4 : Déchiquetage de petits bois

Photo 5 : Récolte de TtCR

Photo 6 : Abattage d'un chêne

Photo 7 : Abatteuse Tigercat à chenille

Photo 8 : Treuil de débardage monté sur tracteur agricole

Photo 9 : Débardage par treuillage au débusqueur

Photo 10 : Débardage par porteur forestier

Photo 11 : Petite déchiqueteuse portée

Photo 12 : Déchiqueteuse tractée

Photo 13 : Déchiqueteuse automotrice

Photo 14 : Déchiqueteuse automotrice

Photo 15 : Fagotteuse

Photo 16 : Tas de fagots

Photo 17 : Fendeuse horizontale (Kretzer)

Photo 18 : Fendeuse verticale avec treuil de levage (Rabaud)

Photo 19 : Fendeuse avec grue (POSCH)

Photo 20 : Scie-fendeur horizontale (Japa)

Photo 21 : Scie-fendeur (Binderberger)

Photo 22 : Scie-fendeur (BGU Maschinen)

Photo 23 : Scie-fendeur (Palax)

Photo 24 : Fendage et découpe en bûches

Photo 25 : Petite fendeuse électrique (Kretzer)

Photo 26 : Plate-forme mobile (Pinosa)

Photo 27 : Scie à bûches

Photo 28 : Recoupe d'un fagot sur palette (Woodmax)

Photo 29 : Découpeuse de fagots (Arci) en 50 cm

Photo 30 : Enstérage de bûches

Photo 31 : Presse à granulés Alpha Lucerne

Photo 32 : Filière à granulés

Photo 33 : Déchiqueteuse automotrice sur coupe

Photo 34 : Déchiqueteuse bord de chemin forestier

Photo 35 : Déchiqueteuse bord de route

Photo 36 : Stockage de rémanents

Photo 37 : Stockage à l'air libre

Photo 38 : Stockage et séchage de plaquettes sous hangar

Photo 39 : Transport de plaquettes

Photo 40 : Livraison par soufflag

Photo 41 : Fagots stockés bord de route

Photo 42 : Stères, bord de route

Photo 43 : Palettes de bûches

Photo 44 : Petits camions de livraison

Photo 45 : Porteurs routiers

Photo 46 : Ensacheuse

Photo 47 : Bigs bags

Photo 48 : Palette de sacs de 15 kg de granulés

Photo 49 : Cheminée à foyer ouvert (René Brisach)

Photo 50 : Cheminée à foyer fermé

Photo 51 : Poêle traditionnel (Palazetti)

Photo 52 : Poêle cheminée

Photo 53 : Poêle à accumulation (Roger Charot)

Photo 54 : Poêle cheminée (Tulikivi)

Photo 55 : Cuisinière (Loheraer)

Photo 56 : Poêle à granulés télécommandé (MCZ)

Photo 57 : Poêle à granulés (Thermorossi)

Photo 58 : Chaudière à alimentation semi-automatique

Photo 59 : Chaudière automatique à granulés (Hargassner)

Photo 60 : Chaufferie du réseau de chaleur de Nuzéjols (Lot)

Photo 61 : Réseau primaire de distribution de chaleur

Photo 62 : Granulés de bois en sac

Photo 63 : Déchiquetage d'une cime résineuse (J.G Béguin)

Photo 64 : Valorisation de matériel agricole (source: J.G Béguin)

Photo 65 : Utilisation de matériel agricole (J.G Béguin)

Photo 66 : Production de plaquettes forestières

Photo 67 : Vue d'ensemble du hangar de stockage

Photo 68 : Stockage de plaquettes

Photo 69 : Le bâtiment chauffé

Photo 70 : La déchiqueteuse

Photo 71 : Le dessileur rotatif

Photo 72 : La chaudière

Liste des schémas

Schéma 1 : Scie-fendeuse sur plate-forme

Schéma 2 : Cubage du bois de chauffage

Schéma 3 : Déchiquetage sur coupe

Schéma 4 : Déchiquetage sur tas débardé

Schéma 5 : Déchiquetage sur plate-forme

Schéma 6 : Déchiquetage sur plate-forme avec mise en ballots

Schéma 7 : Production traditionnelle de bûches (Cas 1)

Schéma 8 : Production de bûches avec cerclage en 1m (Cas 1bis)

Schéma 9 : Production mécanisée de bûches en forêt

Schéma 10 : Production mécanisée de bûches en forêt avec cerclage (Cas 2bis)

Schéma 11 : Production mécanisée de bûches sur plate-forme



- Schéma 12:** Porteur routier + remorque
- Schéma 13:** Processus de la combustion du bois [Thomas Nussbaumer, Jürgen Good, Verenum]
- Schéma 14:** Cogénération par filière combustion/turbine à vapeur
- Schéma 15:** Principe de l'installation (source ITEBE)
- Schéma 16:** Cheminée à foyer ouvert (Richard Le Droff)
- Schéma 17:** Récupérateur d'air et diffusion (Richard Le Droff)
- Schéma 18:** Cheminée-chaudière (Palazetti)
- Schéma 19:** Principe de fonctionnement
- Schéma 20:** Poêle à accumulation (Tulikivi)
- Schéma 21:** Poêle à accumulation
- Schéma 22:** Fonctionnement d'une cuisinière (Gatine)
- Schéma 23:** Schéma type d'installation conseillée (Gatine)
- Schéma 24:** Chaudière à tirage naturel (Baxi)
- Schéma 25:** Chaudière à tirage forcé (Boderus)
- Schéma 26:** Utilisation d'un ballon d'eau chaude (Künzel)
- Schéma 27:** Principe de fonctionnement (envirofire)
- Schéma 28:** Schéma et principe de la chaudière automatique
- Schéma 29:** Chaudière à grille plane et vis de poussée horizontale
- Schéma 30:** Chaudière à pot foyer
- Schéma 31:** Chaudière automatique à grille mobile
- Schéma 32:** Principe de fonctionnement d'une chaudière à granulés
- Schéma 33:** Différentes possibilités d'implantation du silo (Biotech)
- Schéma 34:** Chaufferie et stockage d'un réseau de chaleur
- Schéma 35:** Fonctionnement d'une chaufferie automatique bois
- Schéma 36:** Equivalences simplifiées entre les combustibles
- Schéma 37:** Cubage du bois de chauffage
- Schéma 38:** Principe de fonctionnement



INTRODUCTION AU BOIS ÉNERGIE

Le rôle du bois-énergie dans le scénario européen des sources renouvelables

Une ressource largement disponible

La part de la forêt dans l'occupation du territoire européen tend globalement à s'accroître. Dans la majorité des pays, l'expansion des forêts se poursuit en occupant notamment les espaces abandonnés par l'agriculture. La récolte de bois est largement inférieure à l'accroissement annuel. En moyenne, pour l'Europe 50% seulement de l'accroissement annuel est récolté. La situation diffère selon les pays mais d'une manière générale, le potentiel de prélèvement - sans atteinte au renouvellement du capital- est encore large. Une bonne partie de ce potentiel est mobilisable pour l'énergie. Avec l'entrée des 10 nouveaux pays dans l'Union en 2004, cette ressource est encore accrue.

Le bois-énergie est aujourd'hui la principale source d'énergie

renouvelable de l'union européenne : il représente plus de 50 % de la production d'énergie primaire communautaire à partir des énergies renouvelables.

D'après Eurobserv'er (cf Tableau 1), la production primaire de bois-énergie pour l'année 2004 était de 55,4 Millions de Tonne Equivalent Pétrole pour les pays de l'Union Européenne des 25. Cette production inclut les déchets de bois, les liqueurs noires et les résidus solides de récolte. La production était principalement destinée à des usages thermiques mais l'utilisation du bois et de ses dérivés pour la production d'électricité est en croissance.

La part du bois-énergie dans la production d'énergie primaire de l'Union Européenne des 25 correspondait à 3,2 % en 2004 contre 3% en 2003.

Tableau 1: Consommation d'énergie primaire provenant du bois-énergie dans les pays de l'Union européenne des 25 en 2004
(en Millions de TEP) [Source : EUROBSSEVER 2005]

(en Mtep)	2003	2004 (estimation)	Croissance en %
France/France	9,002	9,180	2
Suède/Sweden	7,927	8,260	4,2
Finlande/Finland	6,903	7,232	4,8
Allemagne/Germany	5,191	6,263	20,7
Espagne/Spain	4,062	4,107	1,1
Pologne/Poland	3,921	3,927	0,2
Autriche/Austria	3,222	3,499	8,6
Portugal/Portugal	2,652	2,666	0,5
Lettonie/Latvia	1,240	1,300	4,8
Royaume-Uni/United Kingdom	1,084	1,231	13,6
Danemark/Denmark	1,071	1,113	3,9
Italie/Italy	1,015	1,083	6,7
Rép.Tchèque/Czech Rep.	0,895	1,007	12,5
Grèce/Greece	0,909	0,927	1,9
Hongrie/Hungary	0,777	0,805	3,6
Pays-Bas/Netherlands	0,561	0,720	28,2
Lituanie/Lithuania	0,672	0,697	3,7
Slovénie/Slovenia	0,422	0,422	0,0
Belgique/Belgium	0,346	0,382	10,4
Slovaquie/Slovakia	0,300	0,303	1,1
Estonie/Estonia	0,150	0,150	0,0
Irlande/Ireland	0,145	0,144	-0,6
Luxembourg/Luxembourg	0,015	0,015	0,0
Chypre/Cyprus	0,006	0,006	0,0
Malte/Malta	0,000	0,000	
Total Europe à 25/E.U. 25	52,488	55,439	5,6



Une source d'énergie économiquement accessible

Les plus gros producteurs de bois-énergie sont respectivement la France, puis la Suède, la Finlande et l'Allemagne. Ces quatre pays totalisent plus de 60 % de la production européenne de bois-énergie. Dans plusieurs pays européens, la part du bois-énergie a une place importante dans la production d'énergie primaire comme la Finlande (57 %), le Portugal (47%), l'Autriche (32%) et la Suède (27,5).

Les dernières enquêtes sur le prix de l'énergie, en France, en

Italie et dans bien d'autres pays, confirment le bois comme le combustible le moins cher du marché, en particulier sur le secteur domestique. Quelle aubaine, s'il en était de même pour toutes les énergies renouvelables, toujours est-il que ce n'est pas cet aspect qui freinera le développement. Les investissements industriels à consentir, quant à eux ne sont pas plus lourds que pour les autres filières, bien au contraire. C'est donc la volonté publique européenne, animée par ses engagements internationaux sur l'environnement mondial, et la volonté des consommateurs informés des bienfaits du bois-énergie qui débloquent les choses et les accéléreront.

Perspectives de développement et stratégies pour les cycles de production de bois-énergie

L'Union Européenne place donc le bois-énergie à l'un des premiers plans en matière d'approvisionnement énergétique futur pour l'augmentation de son indépendance énergétique et dans sa démarche de développement durable.

Elle a comme objectif à l'horizon 2010, de fournir 12 % de sa consommation intérieure brute d'énergie à partir de sources d'énergies renouvelables soit pour le bois une augmentation de la production de 100 % avec 45 MTEP. Ceci correspond à un marché de plus de 30 millions de logements à chauffer par le bois au moyen d'appareils de chauffage individuels, de chauffages collectifs et de chauffages urbains.

Les efforts de développement portent actuellement essentiellement sur les chaufferies collectives et les réseaux de chaleur, grâce à la mise en place de plans de soutien nationaux ou régionaux adaptés, comme en Autriche, au Danemark, en Finlande, en Suède mais aussi en France, en Italie ou en Allemagne. En ce qui concerne la cogénération à partir du bois, de gros efforts restent cependant encore à faire dans beaucoup de pays pour que le bois trouve une place dans le nouveau marché en libéralisation de l'électricité.

Enfin, concernant le chauffage individuel, les efforts de développement sont encore faibles, alors que plus de 85 % des logements de l'Union Européenne sont chauffés par des systèmes individuels. Mais l'offre de technologies désormais existante pour les particuliers devrait apporter des résultats encore plus importants que ceux apportés par les secteurs industriels et collectifs. Mais pour y arriver, il va falloir beaucoup plus de monde qu'il n'y en a maintenant pour faire fonctionner cette machine.

Ceci est bien sûr une invitation à rejoindre les centaines d'entreprises, d'associations et d'organisation qui au travers l'Europe travaillent déjà à la promotion et à la mise en œuvre du bois-énergie : il y a des dizaines de milliers d'emplois nouveaux à créer !

Stratégies pour la production de chaleur à partir du bois

Approvisionnement en combustibles

- Démonstration d'équipements innovants dans les systèmes de traitements des résidus forestiers

- Démonstration de machines de récolte, transport et de techniques stockage du bois-énergie
- Systèmes capables d'accélérer le développement des logistiques d'approvisionnement en biocombustibles

Technologie de combustion

- Démonstration des innovations technologiques favorisant l'amélioration du rendement, la réduction des investissements et la réduction des émissions.
- Démonstrations de technologies innovantes élargissant l'éventail des combustibles pouvant être utilisés

Chauffage domestique

- Démonstration de système de chauffage à la biomasse hors des zones d'utilisation traditionnelle, avec des systèmes de collecte, de récolte et de production.
- Développement d'équipements permettant la réduction des coûts, la baisse des émissions, l'augmentation de la fiabilité des unités de chauffage, et l'amélioration de la collecte, de la production, du stockage et de l'approvisionnement en combustibles.

Mesures d'intégration

- Quantifier les bénéfices environnementaux du bois-énergie et permettre de les chiffrer
- Projets mettant en relief une approche en système intégré permettant l'amélioration de la fiabilité
- Normalisation de standards européens pour les combustibles bois, les émissions, les équipements, la sécurité

Activités de marché

- Un éventail d'activité marketing innovantes pour disséminer l'information (brochures, CD-ROMs, vidéos, bases de données, workshops, séminaires, expositions, stages).



Stratégies pour la production d'électricité à partir du bois

Approvisionnement en combustible

- Démonstration d'équipements innovants dans les systèmes de traitements des résidus forestiers.
- Démonstration de machines de récolte, transport et stockage de bois-énergie.
- Recherche et développement sur les cultures énergétiques alternatives pour les zones adaptées.
- Continuer les programmes d'amélioration des plantes pour les cultures énergétiques dans le but d'améliorer les rendements.
- Développer des systèmes capables d'accélérer le développement du secteur de l'approvisionnement en combustible biomasse.

Combustion

- Les démonstrations de technologies innovantes pour améliorer le rendement, réduire les coûts d'investissements, élargir l'éventail des combustibles utilisés, et réduire les émissions.
- Les démonstrations de petites unités de cogénération.

Gazéification/Pyrolyse

- Les démonstrations couvrant un éventail de technologies de gazéification et de pyrolyse appropriées à un grand nombre de régions différentes de l'EU.
- La recherche & développement appliquée et la démonstration de petites unités de cogénération utilisant des systèmes avancés.
- Les démonstrations de systèmes de pyrolyse.

Mesures d'intégration

- Quantifier les bénéfices environnementaux du bois-énergie et permettre de les chiffrer.
- Projets mettant en relief une approche en système intégré permettant l'amélioration de la fiabilité.
- Normalisation de standards européens pour les combustibles bois, les émissions, les équipements, la sécurité.

Activités des marchés

- Un éventail d'activité marketing innovantes pour disséminer l'information (brochures, CD-ROMs, vidéos, bases de données, workshops, séminaires, expositions, stages).

Cycle de production de bois-énergie et développement rural

L'utilisation du bois à des fins énergétiques présente de nombreux avantages au niveau local, ceux-ci mobilisent de plus en plus les pouvoirs politiques et économiques :

- Intérêt économique immédiat et consolidation d'emplois pour l'ensemble des professions agricoles et forestières, grâce à la diversification vers la valorisation énergétique de leurs sous-produits d'exploitation forestière et de transformation.
- Création de richesse et doublement des emplois actuels sur ce secteur énergétique : le bois-énergie génère 4 à 5 fois plus d'emplois que ses concurrents gaz, fioul, charbon ou électricité. 2000 m³ de bois-énergie (volume foisonné) créent directement un emploi qualifié à temps complet d'entrepreneur forestier, de transporteur, de fabricant d'équipement, d'ingénieur concepteur, de commerçants, d'installateur ou encore de développeurs.

- Utilisation d'un combustible compétitif pour les usagers.
- Augmentation de la confiance générale de l'économie par amélioration de l'indépendance énergétique par la limitation des risques de dérapage des prix liés aux crises internationales.
- Participation à la protection et à l'amélioration de l'environnement local.
- Pérennisation des approvisionnements par utilisation d'une énergie renouvelable.
- Contribution à l'entretien de la forêt et du paysage rural, amélioration de l'état sanitaire des forêts et lutte contre les incendies.
- Financement des travaux sylvicoles (dépressage, éclaircies et élagage) qui se faisaient de moins en moins et réinvestissement dans la qualité de la forêt productrice de demain en matériau et en combustible renouvelable.

Cycle de production de bois-énergie et impacts environnementaux

Le développement durable, un contexte mondial très favorable au bois-énergie

L'énergie est présente dans tous les domaines d'activités des hommes. Les sources d'énergie fossiles sont par définition épuisables et sont la cause de pollutions graves et de guerres. Les pays les moins favorisés ont besoin d'améliorer leur qualité de vie, doivent faire face à leur croissance démographique et ont peu accès aux énergies fossiles trop chères. Quant aux pays industria-

lisés, ils subissent une dépendance énergétique coûteuse et sont en prise avec de graves problèmes environnementaux.

Bon nombre de pays sont en train de réagir en associant étroitement les dimensions de l'environnement, du développement et de l'économie, autrement dit inventent le développement durable. Le bois-énergie, qui est déjà l'énergie renouvelable la plus utilisée au niveau mondial, est une pièce maîtresse du développement durable.



Le bois, un combustible renouvelable

Le bois est une source d'énergie renouvelable par photosynthèse. Sa consommation raisonnée n'entame pas le patrimoine des générations futures. Il permet d'économiser les énergies fossiles dont les stocks sont limités (pétrole, gaz, charbon, uranium) et dont la répartition est très inégale au niveau mondial. La durée de reconstitution du bois est de loin la plus rapide si l'on compare

avec les autres énergies. Mais l'argument majeur du bois-énergie, c'est qu'il ne contribue pas à l'effet de serre. La quantité de CO₂ dégagée lors de la combustion du bois est comparable à celle produite naturellement lors de sa décomposition, cette quantité de CO₂ correspond à celle qui a été extraite de l'air pour la photosynthèse au cours de la croissance de l'arbre. Un équilibre est de la sorte obtenu. Le bilan CO₂ est donc neutre.

Tableau 2 : Comparaison des temps de reconstitution pour le bois, le charbon et le pétrole

Energie	Durée de reconstitution	Estimation réserves
Bois	De 3 à 100 ans	renouvelable
Charbon	De 250 à 300 millions d'années	300 ans
Pétrole	De 100 à 450 millions d'années	40 ans

Les effets des prélèvements de bois sur les sols et la biodiversité

L'exploitation forestière n'est pas forcément synonyme de déforestation. Si elle n'est pas pratiquée de manière intensive ou sauvage, ce qui est le cas en Europe, elle n'induit pas de conséquence négative sur la qualité du sol, ni sur le régime des eaux et encore moins sur la diversité biologique. La meilleure méthode, et celle qui demande le moins d'investissements, est l'exploitation derrière une sylviculture à régénération naturelle, la nature fait alors comme bon lui semble, et on récolte ce qu'elle veut bien produire. C'est pourquoi il est nécessaire de réaliser l'exploitation de manière raisonnée, en assurant un suivi de l'état des forêts. Dans de très nombreux pays, l'exploitation pour le bois-énergie satisfait cette condition. Ailleurs une éducation et des mesures législatives doivent accompagner tout soutien au bois-énergie.

Les émissions atmosphériques

Considérer les différents facteurs d'émissions peut être utile pour identifier la source des principales substances polluantes générées. Une comparaison de la totalité de ces émissions montre les tendances suivantes :

- Le bois produit environ 20 fois moins d'émissions nettes de CO₂ que le gaz et 30 fois moins que le mazout
- Le bois produit environ 20 fois plus d'émissions de particules que le gaz et 10 fois plus que le mazout. En outre, les émissions d'oxyde d'azote sont 2 fois plus élevées que pour le mazout et 4 fois plus que pour le gaz
- Les émissions de dioxyde de soufre (SO₂) sont 3 fois plus élevées pour le mazout que pour le bois et le gaz
- Le bois présente les émissions totales d'hydrocarbures les plus basses

Tableau 3 : Facteurs d'émissions pour le mazout, le gaz, des plaquettes de bois(hêtre) et des bûches (hêtre) en kg par TJ d'énergie utile (= mg/MJ d'énergie utile), selon l'étude n°315 de l'OFEFP (Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz).

Polluant	Mazout 100 kW	A		Gaz naturel <100 kW	A		Plaquettes de bois 50 kW		A		Bûches 100 kW		A		B	
		A	B		A	B	A	B	A	B	A	B				
CH ₄	112	1	99	412	<1	100	31	77	23	92	93	7				
AHQM	223	1	99	60	5	95	53	68	32	171	83	17				
CO	31	17	83	53	58	42	1510	98	2	1110	95	5				
CO ₂	91100	86	14	66400	87	13	3460	0*	100	3010	0*	100				
SO	126	53	47	33	2	98	40	80	21	39	82	18				
NO _x	92	29	71	51	40	60	199	80	20	168	80	20				
Particules	9,9	1	99	5,8	2	98	117	93	7	126	95	5				

AHQM : Autres hydrocarbures que le méthane

A = Pourcentage de facteurs d'émissions attribuables à la combustion directe seulement

B = Pourcentage de facteurs d'émissions attribuables à l'approvisionnement, au transport et à l'infrastructure.

*. La consommation de CO₂ est considérée seulement en B, car les 150 000 mg CO₂/MJ d'énergie utile des bûches et des plaquettes sont considérés comme renouvelables et récupérés ainsi pour la croissance de la forêt.



Utilisation et élimination des cendres

Lorsqu'elle répond à certains critères, la cendre de bois naturel peut être utilisée comme engrais agricole. Les conditions à remplir et les quantités à utiliser peuvent être déterminées en collaboration avec les organismes régionaux de conseil en fumure agricole. Les cendres de bois totalement naturel peuvent également être utilisées en petites quantités comme engrais dans les jardins potagers. Une surface de 100 m² peut recevoir 30 litres par an, ce que correspond à 5 stères de bois. Des quantités supérieures chargent inutilement le sol et les eaux. Les excédents doivent être éliminés avec les ordures ménagères ou épandues de manière homogène sur d'autres terrains avec l'autorisation du propriétaire. Les cendres de bois non sain ne doivent en aucun cas être utilisées comme engrais, elles doivent être évacuées

conformément à la législation en vigueur. Généralement, les lois interdisent l'usage d'engrais en forêt. La cendre de bois est considérée comme un engrais. Le compost et les engrais minéraux ne peuvent être utilisés qu'en pépinière ainsi que lors de plantations et de semis. Quand les lois forestières le permettent, le retour des cendres en forêt boucle le cycle du bois-énergie.

Les composants principaux des cendres sont le calcium, la silice, la potasse et le magnésium. Ces éléments sont généralement présents sous forme d'oxydes. Pour leurs valeurs d'engrais, les éléments suivants sont importants : calcium (20 à 25 % du poids), potasse (2 à 10%) et phosphore (0,5 à 1,5%). Plus la part de bois non sain est importante (bois de rebut, papier, emballages et même ordures), plus les concentrations en métaux lourds (zinc et plomb) sont importantes dans les cendres.

Tableau 4 : Compositions moyennes des cendres de grille issues de la combustion de différents combustibles bois
(Source : Hasler 1994, Ruckebauer 1995, Noger 1996)

Élément	Unité	Bois	Copeaux	Ecorces	Bois de rebut
P	G/ kg	9,4	10,9	7,4	4,1
Ca	G/ kg	320	250	300	220
Mg	G/ kg	27	34	39	17
k	G/ kg	66	59	42	19
Pb	Mg/ kg	18	36	25	2100
Cd	Mg/ kg	2,2	3,9	17	20
Cr	Mg/ kg	35	140	130	470
Co	Mg/ kg	11	17	24	20
Cu	Mg/ kg	210	180	90	1200
Mo	Mg/ kg	4,5	3,4	4,8	7
Ni	Mg/ kg	45	72	94	180
Hg	Mg/ kg	< 0,5			1
Zn	Mg/ kg	380	1430	620	6900

P : Phosphore, Ca : Calcium, Mg : Magnésium, K : Potassium, Pb : Plomb, Cd : Cadmium, Cr : Chrome, Co : Cobalt, Cu : Cuivre, Mo : Molybdène, Hg : Mercure, Ni : Nickel, Zn : Zinc

Les cendres utilisées comme engrais ne doivent pas dépasser les recommandations suivantes (en mg/kg de substance sèche).

Tableau 5 : Recommandations concernant les teneurs en métaux lourds (source : synthèse ITEBE, article 2004)

Plomb	Cadmium	Chrome	Cobalt	Cuivre	Molybdène	Nickel	Mercure	Zinc
100	3	100	12	150	6	60	1	600



Le bois-énergie, un impact positif sur l'environnement agroforestier et paysager

L'utilisation du bois-énergie contribue à l'entretien de la forêt et du paysage. La valorisation énergétique des déchets agricoles et forestiers permet d'améliorer l'état sanitaire des forêts. En collectant les rémanents, elle évite le développement et la propagation des parasites et maladies. Elle facilite les replantations et encourage les travaux sylvicoles tels que le dépressage ou les éclaircies. Cet encouragement des travaux sylvicoles contribue à améliorer la qualité des bois d'avenir et contribue donc à enrichir le capital forestier.

L'utilisation du bois-énergie permet également de valoriser les sous-produits et déchets de la filière bois matériau. Les entreprises du bois produisent, lors de la transformation du bois, une part importante de sous-produits et de déchets utilisables comme combustibles.

Une filière peu consommatrice d'énergie

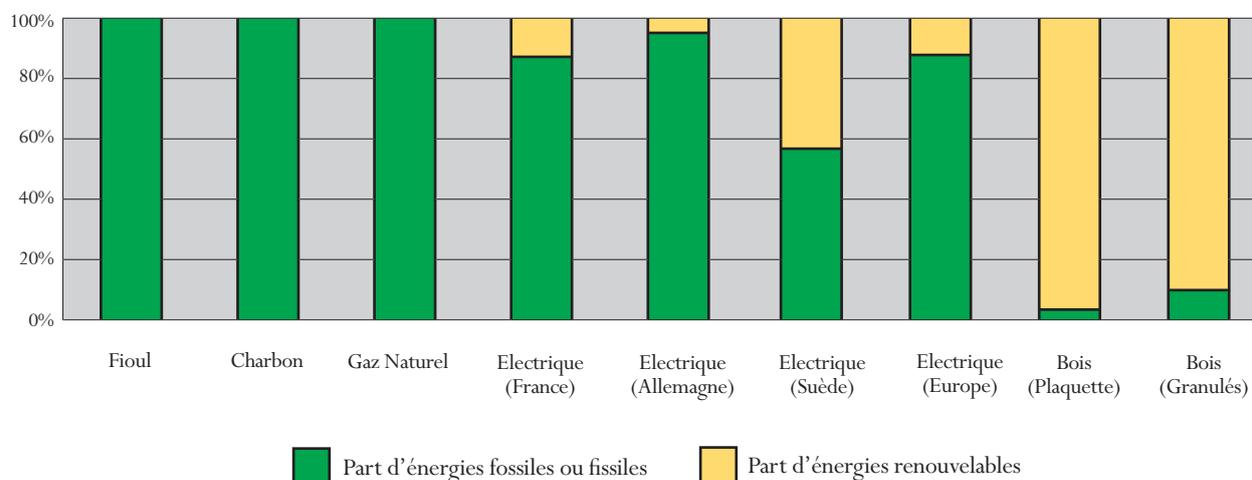
Pour produire une quantité donnée d'énergie sous forme de chaleur, il faut alimenter la chaudière avec une certaine quantité d'énergie sous forme de bois. Le rapport entre la quantité d'énergie consommée sous forme de combustible et

celle produite sous forme de chaleur correspond au rendement de la chaudière. Ces rendements sont actuellement d'environ 85% pour les chaudières à plaquettes, et 90% à 100% pour les chaudières à granulés et ils devraient encore s'améliorer.

Toutefois, pour produire le combustible et l'amener jusqu'à la chaudière, il y a aussi dépense d'énergie, essentiellement sous forme de carburant dans les machines forestières et les camions de transport. La contribution de chaque étape de préparation du combustible nous montre qu'il est peu pénalisant pour la filière de transporter les plaquettes dans un rayon allant jusqu'à 100 km, voire plus.

Le bilan des plaquettes forestières est presque identique à celui du gaz naturel et du fioul. Les plaquettes ont notamment la chaîne de production la moins consommatrice d'énergie, avec seulement 4 kWh d'énergie non-renouvelables dépensés pour la préparation de plaquettes fournissant 100 kWh de chaleur. Ainsi, la part d'énergie renouvelable dans le bilan du bois est très importante, puisque seule la chaîne de production du bois consomme de l'énergie fossile non renouvelable. L'utilisation des plaquettes ou des granulés (avec séchage à partir de bois donc renouvelable) ne consomme que 3 et 9% respectivement d'énergies non renouvelables. La combustion porte ensuite uniquement sur du bois, énergie renouvelable.

Tableau 6 : Part des énergies renouvelables dans la production de chaleur à partir de différents combustibles
(sources : Valeur environnementale de l'énergie, 2000 ; Assessment of bioenergy system, 1999 ; Wood sustain, 2001 ; IEA, 1998)



Combustibles concernés

La production de plaquettes

La production de plaquettes forestières est une activité forestière ou agricole assez ordinaire en tant que tel. Elle enchaîne des opérations pour la plupart classiques : abattage, débardage, transport. Deux opérations sont néanmoins spécifiques : le déchiquetage et le séchage. En fait la difficulté à produire des

plaquettes de qualité à un coût compétitif réside dans la planification des opérations et dans la logistique de fourniture.

Pour le déchiquetage, il existe une gamme assez étendue de possibilités, tant en configuration du travail qu'en productivité. De nombreux types de matériels de très bonne qualité sont disponibles sur le marché. L'opération de déchiquetage s'effectue grâce



à une machine dotée d'un rotor muni de couteaux. La plaquette forestière n'est pas obtenue à partir de broyeurs à marteaux ou fléaux : sa qualité, doit être très régulière pour le bon fonctionnement des installations de chauffage.

Les déchiqueteuses se présentent en cinq configurations : les petites déchiqueteuses portées sur tracteur agricole; les déchiqueteuses tractées; les déchiqueteuses automotrices ; les grandes déchiqueteuses stationnaires sur camion ou semi-remorque ; et les déchiqueteuses à postes fixes.



Photo 1 : Plaquette forestière

La production de bois bûches

Dans de nombreux pays européens, le bois sous forme de bûche est le combustible bois le plus utilisé : chaque année, en France par exemple, près de 50 millions de stères sont consommés. Cependant, ce marché est soumis à plusieurs facteurs de pression : les marchés parallèles, les énergies concurrentielles, un prix de revient parfois élevé, une qualité du combustible irrégulière, un confort d'utilisation à moderniser.

Des efforts visant l'amélioration de la qualité des produits et la diminution des coûts d'exploitation sont en conséquence une nécessité urgente pour développer ce marché. Il est un intérêt de rationaliser la récolte et la préparation des bûches. Cette production était jusque maintenant effectuée de manière principalement traditionnelle. Elle se modernise aujourd'hui avec des méthodes de production mécanisées. La tendance est au transfert des opérations de façonnage de la forêt vers des sites fixes de production.

Les logistiques de production de bois de chauffage sont encore souvent non spécifiques, car le bois de chauffage n'est encore souvent considéré que comme un co-produit de l'exploitation de bois d'œuvre. La venue ces dix dernières années de nouveaux équipements tous au long de la filière de production de bois de chauffage (par exemples : abatteuses, combinés scie-fendeuse, entèreuses...) a permis d'améliorer et d'envisager des logistiques de récolte et de préparation de bois de chauffage à part entière.



Photo 2 : Bûches

La production de granulés

Nés aux USA dans les années 1970, les granulés ne sont apparus en France que vers les années 1980. A l'heure actuelle, la production européenne reste dominée par celle des pays de la mer Baltique. Mais la filière se développe de plus en plus dans des pays comme l'Allemagne, l'Autriche et l'Italie qui ont connu une très forte augmentation de leur production.

La fabrication de granulé à partir de sciures et de copeaux non traités peut être décrite en 3 étapes essentielles :

- le séchage : il permet une humidité régulière.
- le broyage : il assure une granulométrie moyenne idéale
- la granulation : elle est faite moyennant une presse à granulés qui compresse mécaniquement la matière première grâce à deux rouleaux.

Pour assurer une viabilité aux installations de granulation, il faut produire au delà de 15 000 tonnes/an.

De petites unités de granulation peuvent néanmoins être réalisées mais leur maintenance reste relativement onéreuse et rendent ces unités peu satisfaisantes.

Les granulés sont utilisés en substitution des énergies traditionnelles mais nécessitent des matériels spécifiques comme les poêles et les chaudières. Généralement, ils sont destinés au chauffage et à la production d'eau chaude.

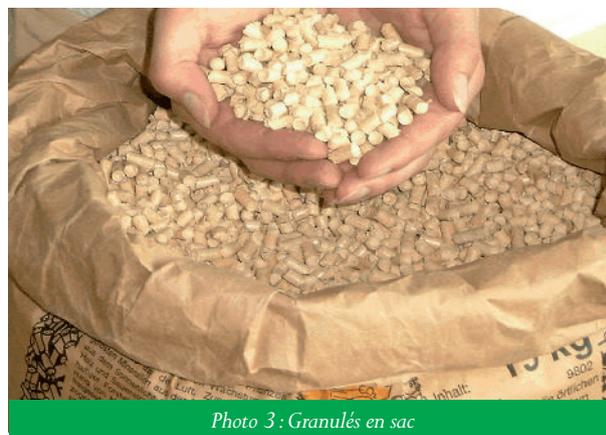


Photo 3 : Granulés en sac

