



Mémento 2004 du bois-énergie

LES BONNES PRATIQUES DU BOIS-ENERGIE



ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

AVANT PROPOS

Le Mémento 2004 du bois-énergie est une publication de l'ITEBE, association internationale des professionnels et usagers des bioénergies. Il a été réalisé avec le concours financier de l'agence française de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, ADEME.

L'ITEBE est une association à but non lucratif agissant pour le développement des bioénergies dans le cadre d'un développement durable de notre société. Les actions de l'ITEBE sont neutres de toute considération commerciale ou politique et sont mises en place aux seules fins de favoriser l'amélioration des technologies et des pratiques dans le secteur des bioénergies.

Ce Mémento s'adresse à tous publics.

SOMMAIRE

Généralités	Page 3
<i>Qu'est ce que le bois-énergie ?</i>	<i>Page 3</i>
<i>12 raisons pour utiliser le bois-énergie</i>	<i>Page 3</i>
<i>Le bois-énergie et l'environnement</i>	<i>Page 4</i>
Les caractéristiques des combustibles	Page 7
<i>La composition du bois, c'est CHO!</i>	<i>Page 7</i>
<i>Le pouvoir calorifique</i>	<i>Page 7</i>
<i>Les différents combustibles</i>	<i>Page 10</i>
La production d'énergie	Page 14
<i>Les principes physiques de la combustion</i>	<i>Page 14</i>
<i>Les rendements</i>	<i>Page 15</i>
<i>Les applications</i>	<i>Page 16</i>
Chiffres clés	Page 17
Petit glossaire du bois-énergie	Page 19
Unités & conversions	Page 21

GENERALITES

Qu'est ce que le bois-énergie ?

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 issue 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'années, 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 de haie...)
- de l'agriculture (produits d'élagage du bocage, taillis à courtes rotations, déchets de productions agricoles...)
- des activités humaines (bois de récupération...)
- des activités industrielles (plaquettes, sciures, copeaux, granulés, briquettes...)

12 raisons pour utiliser le bois-énergie

Raisons économiques

1. **Utiliser le bois-énergie c'est profiter d'un combustible compétitif**, le bois est l'un des combustibles les moins chers sur la plupart des marchés du monde,
2. **Utiliser le bois-énergie c'est créer des emplois**. A énergie équivalente et à coût égal le bois-énergie créé 4 à 5 fois plus d'emplois que ses concurrents gaz, fioul, charbon ou électricité : un potentiel énorme !
L'utilisation de 1000 m³ de bois pour l'énergie créé directement de un à deux emplois qualifiés à temps complet.
3. **Utiliser le bois-énergie permet de réinjecter localement les dépenses d'énergie** et de dynamiser les économies locales,
4. **Utiliser le bois-énergie permet d'augmenter l'indépendance énergétique des régions, des états et de sécuriser leurs approvisionnements**,
5. **Utiliser le bois-énergie, énergie renouvelable, permet d'économiser les énergies fossiles** dont les stocks sont limités (pétrole, gaz, charbon, uranium).
6. **Utiliser le bois-énergie, permet de moins focaliser la demande énergétique sur une seule ressource comme le pétrole, au risque de créer des tensions politiques internationales, sources de véritables catastrophes économiques et humaines.**

Raisons environnementales

7. **Utiliser le bois-énergie, c'est lutter contre le changement climatique**, car les quantités de carbone libérées par la combustion du bois sont réabsorbées par les arbres de remplacement,
8. **Utiliser le bois-énergie, c'est utiliser un combustible naturel, peu énergivore à produire et non polluant**,
9. **Utiliser le bois-énergie, c'est recycler les déchets** des entreprises du bois et des déchetteries,
10. **Utiliser le bois-énergie, c'est contribuer à la productivité, donc à l'utilité et à l'entretien des forêts et du paysage**. Cela favorise les replantations, encourage les travaux sylvicoles tels que le dépressage ou les éclaircies. améliore la qualité des bois d'avenir et contribue donc à enrichir le capital forestier.
11. **Utiliser le bois-énergie permet d'éviter les grandes catastrophes écologiques** telles que les marées noires, explosion, radioactivité...).

Raisons personnelles

12. **Utiliser le bois-énergie, c'est jouir d'une énergie agréable, conviviale et maintenant bien adaptée à la vie moderne.**

Le bois-énergie et l'environnement

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 industrialisés, 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 **DEVELOPPEMENT DURABLE**.

Le bois-énergie, qui est déjà l'énergie renouvelable la plus utilisée au niveau mondial, est une pièce maîtresse du développement durable.

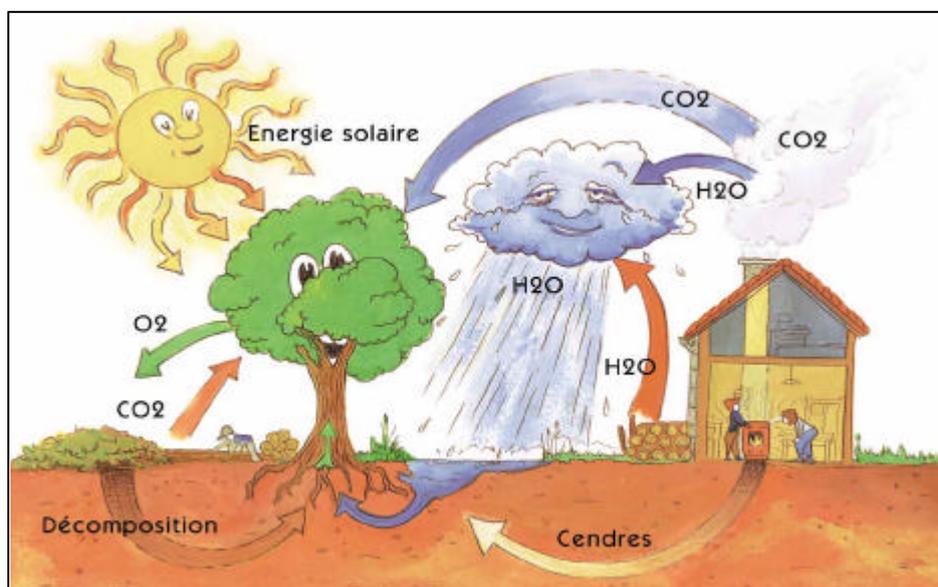
Le bois, un combustible renouvelable

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 inégales au niveau mondial. La durée de reconstitution du bois est de loin la plus rapide si l'on compare avec les autres énergies.

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

Energie	Durée de reconstitution	Estimation réserves
Bois	De 15 à 200 ans	renouvelable
Charbon	De 250 à 300 millions d'années	500 ans
Pétrole	De 100 à 450 millions d'années	50 ans

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



Le cycle du bois-énergie (dessin : Ajena)

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 de 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

Polluant	Mazout 100 kW	A	B	Gaz naturel <100 kW	A	B	Plaquettes de bois 50 kW	A	B	Bûches 100 kW	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 ₂	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

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).

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 homogènement 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. Si la loi forestière le permettait, le retour des cendres en forêt bouclerait 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.

Compositions moyennes des cendres de grille issues de la combustion de différents combustibles bois

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

Source : Hasler 1994, Ruckenbauer 1995, Noger 1996
P : Phosphore, Ca : Calcium, Mg : Magnésium, K : Potassium, Pb : Plomb, Cd : Cadmium, Cr : Chrome,
Co : Cobalt, Cu : Cuivre, Mo : Molybdène, Ni : Nickel, Hg : Mercure, Zn : Zinc

Recommandations concernant les teneurs en métaux lourds.

Les cendres utilisées comme engrais ne doivent pas dépasser les recommandations suivantes (en mg/kg de substance sèche)

Plomb	Cadmium	Chrome	Cobalt	Cuivre	Molybdène	Nickel	Mercur	Zinc
100	3	100	12	150	6	60	1	600

Le bois-énergie, un impact positif sur l'environnement forestier et paysager

L'utilisation du bois-énergie contribue à l'entretien de la forêt et du paysage. La valorisation énergétique des déchets 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.

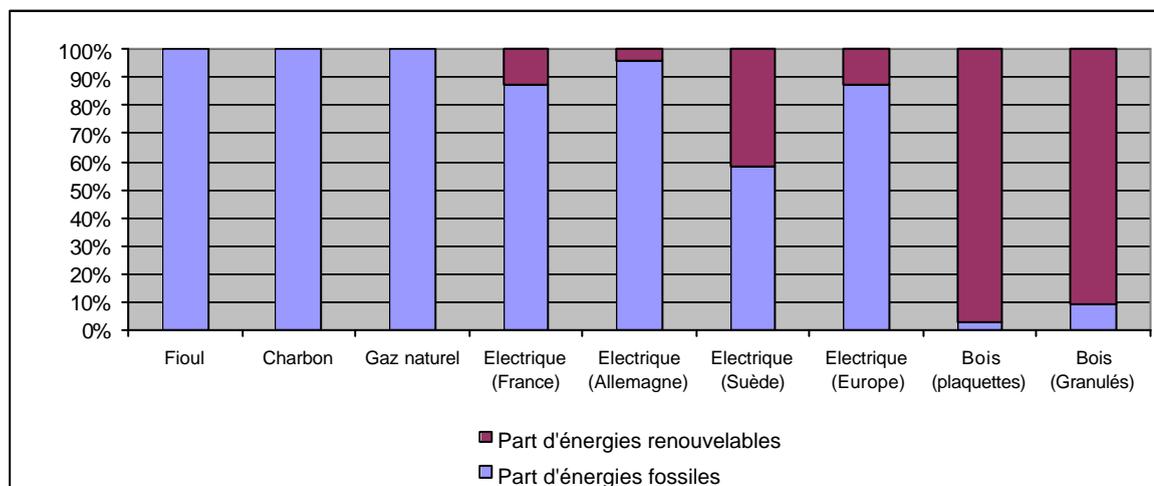
L'utilisation du bois-énergie permet également de valoriser les sous-produits et déchets de la filière bois matériau. Les entreprises du bois produisent, lors de la transformation du bois, une part importante de sous-produits et de déchets utilisables comme combustible.

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 80% pour les chaudières à plaquettes, et 85% 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 est donné dans le graphique ci-dessous. On remarque 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 énergivore, avec seulement 4kWh 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.

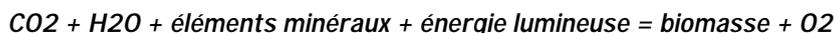


Part des énergies renouvelables dans la production de chaleur à partir de différents combustibles (sources : Valeur environnementale de l'énergie, 2000 ; Assessment of bioenergy system, 1999 ; Wood sustain, 2001 ; IEA, 1998)

LES CARACTERISTIQUES DES COMBUSTIBLES

La composition du bois, c'est CHO !

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.

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 :

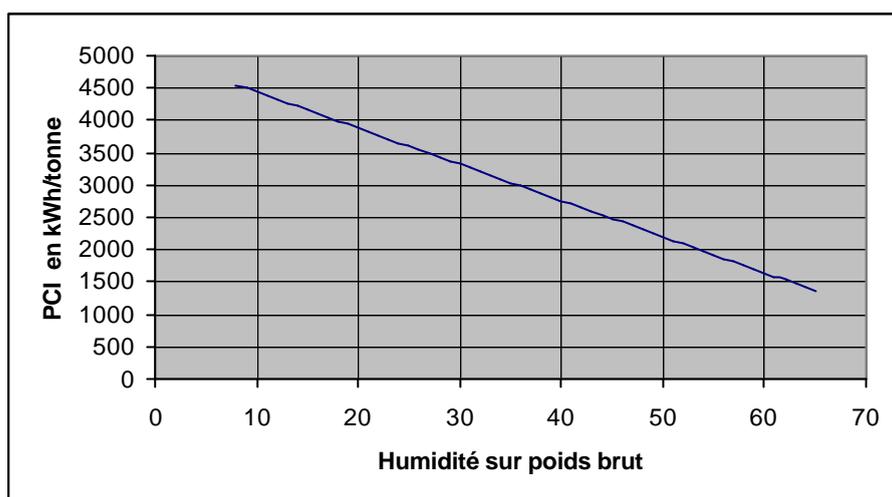
- L'eau de constitution des molécules ligneuses qui est liée au bois par voie chimique.
- L'eau d'imprégnation et de capillarité contenu dans les parois cellulaires et les pores du bois qui est liée au bois par voie physique. Cette eau peut être éliminée par séchage.

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 à 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.

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		



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 :

$$PCI = \frac{PCI_0 \times (100 - Hpb)}{100} - 0.006 \times Hpb$$

Avec :
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

PCI des différents 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.

Exemples de quelques PCI

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	4910	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

Influence de l'essence sur le pouvoir calorifique et la masse volumique

La masse volumique réelle indique le poids d'un volume donné de bois plein. Elle s'exprime en kg/m³. La masse volumique et le PCI dépendent de l'essence et de l'humidité du bois. (Données France).

Type de bois		Essence	Pouvoir calorifique à l'état anhydre	Masse Volumique mini	Masse Volumique maxi
			<i>kWh/kg ou MWh/t</i>	<i>kg/m³ plein</i>	<i>kg/m³ plein</i>
Bois durs	Feuillus	Buis		910	1160
		Chênes	4,9	550	900
		charme	4,8	800	900
		hêtre	4,9	690	910
		frêne	5	630	1000
		orme	5,1	600	850
		acacia		660	770
		bouleau	5	600	630
		châtaignier		550	740
		marronnier	5,2	540	540
		fruitiers	4,9	580	860
		érables	5,3	570	740
		Bois tendres	Feuillus	tilleul	
aulne	4,9			440	660
peupliers	4,8			400	700
saule	4,8			380	520
Résineux	if			670	900
	cèdre			450	810
	pin sylvestre		5,3	480	890
	pin maritime			520	770
	pin Weymouth		5,2	320	490
	sapin		5,1	380	650
	épicéa		5,2	340	580
	mélèze		5,3	450	670
	douglas		5,2	450	480

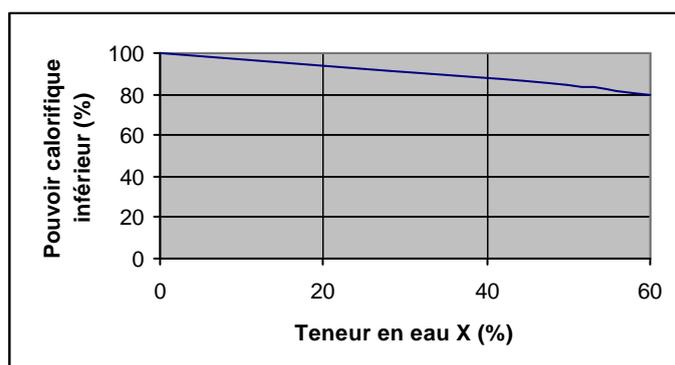
Variation du PCI d'un volume de combustible en fonction de l'humidité

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le PCI d'un volume de bois ne varie pas énormément en fonction de l'humidité. Quelque soit l'humidité, la quantité de matière sèche sera la même, la différence vient de l'eau à évaporer. C'est quand on compte en tonne que les différences de PCI sont importantes

Le stère

Type de bois		Essence	PCI											
			10		15		20		30		40		50	
			Poids /stère	KWh /stère										
Bois durs	feuillus	Hêtre	434	1876	459	18581	488	1843	558	1801	651	1745	781	1667
		Chêne	457	2000	484	1984	514	1965	588	1923	686	1864	823	1781
Bois tendres	résineux	épicéa	281	1298	297	1286	316	1277	361	1249	421	1212	505	1161
		pin	348	1607	369	1598	392	1584	448	1550	522	1503	627	1442

Variation en pourcentage du PCI d'un volume de bois



Les différents combustibles bois

Tous au long de la filière bois sont générés des sous-produits : lors de l'exploitation forestière, lors de l'élagage des haies, des bords de routes ou des parcs, dans l'industrie du bois de première (les scieries) et de deuxième transformation (menuiseries, les tourneries, ...), et enfin lors de la récupération des bois de rebut (palettes, ...). Bon nombre de ces produits peuvent être utilisés comme combustible dans des appareils de chauffage au bois. Les combustibles bois se présentent ainsi sous plusieurs formes (bûches, plaquettes, écorces, sciures, copeaux, chutes, briquettes et granulés) avec des caractéristiques très différentes.

EXPLOITATION FORESTIERE ET ENTRETIEN PAYSAGER



INDUSTRIES DE LA 1 ERE DE LA 2 EME TRANSFORMATION DU BOIS



LES BOIS DE REBUTS (OU LES BOIS USAGES)



Les combustibles issus de la forêt

Les sous-produits de l'exploitation forestière et de l'entretien paysager (les branchages, les écorces, les sciures, la souche) représentent environ 60% de l'arbre alors que le bois d'œuvre ne représente que 40%.
Les combustibles bois générés sont **les bûches et les plaquettes**.

Les combustibles issus de l'industrie du bois

Les sous-produits de l'industrie de la première (scieries) et de la deuxième transformation (ameublements, menuiseries, ...) représentent environ 75% du bois d'œuvre entré en scierie, alors que le produit fini ne représente que 25%. Les scieries produisent des déchets humides et les entreprises de la deuxième transformation produisent des déchets secs. Une partie de ces déchets et sous-produits est valorisée en bois-énergie.
Les combustibles bois générés sont **les écorces, les copeaux, les sciures, les plaquettes et les chutes**.

Les combustibles issus de la récupération

Les bois de rebut correspondent à des produits en bois "en fin de vie" ou usagés. Ils se répartissent dans plusieurs catégories : bois issus des chantiers et de démolition, meubles et objets divers, emballages (palettes, caisses, etc.).
Les combustibles bois générés sont **les broyats de bois de rebut**.

Les combustibles bois issus de la forêt

Proportion volumique des différents produits connexes lors de l'exploitation forestière [Source CTBA]

Produits connexes de l'exploitation forestière	
Houppiers et branchages	27 à 30 %
Souches	23 à 25 %
Ecorces	3 à 5 %
Sciures	4 à 5 %

Toute cette ressource peut être valorisée en combustible plaquettes par déchetage si elle ne trouve pas d'autre débouché plus rémunérateur. 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.

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

Type de coupe	Déchetage	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

Le combustible bois bûches



Les bûches de bois dur sont à utiliser de préférence au bois tendre car elles ont un contenu énergétique plus important. Le bois doit être utilisé, de préférence, très sec. Il est souhaitable de le faire sécher sous abri pendant 6 à 12 mois pour atteindre une humidité de 20 %. Le bois contenant un taux d'humidité très important entraîne une mauvaise combustion qui pollue et détériore prématurément l'appareil, la vitre et le conduit.

Le conditionnement peut se faire en rondins ou en quartiers de 25 cm, 33 cm, 50 cm ou 1m. Le bois peut être mesuré en volume (stères) ou en poids (kg): le stère est un lot de bûches de 1m de long, empilées de façon à constituer un parallélépipède de 1m de côté et 1 m de hauteur.

Le contenu énergétique des bûches de bois dur est en moyenne de 3900 kWh par tonne.

Le combustible bois plaquette forestière (bois décheté)



Le conditionnement peut se faire par de petites déchiqueteuses entraînées par un tracteur ou, pour les chantiers plus importants, avec une déchiqueteuse autonome à disque ou à tambour équipée d'une grue. Comme unité de mesure, on peut utiliser le: MAP Mètre cube apparents de plaquettes, la tonne, ou directement le contenu énergétique (kWh d'entrée à la chaufferie).

Les plaquettes fines et sèches sont utilisées dans des petites chaudières automatiques dans des habitations individuelles ou des petits réseaux de chaleurs. Les grosses plaquettes sont utilisés dans des chaufferies collectives et des réseaux de chaleur.

Le contenu énergétique des plaquettes forestières vertes est en moyenne de 2200 à 2800 kWh par tonne pour une humidité de 40 à 50%. Pour des plaquettes forestières fines et sèches, le contenu est 3300 à 3900 kWh par tonne. Le prix est très variable en fonction du transport et de l'humidité.

Les combustibles bois issus de l'industrie du bois

L'industrie du bois, lors de chaque étape de la transformation du bois génère des sous-produits. Les entreprises de la **première transformation**, notamment les scieries, sont les entreprises qui produisent l'essentiel des déchets et des produits connexes. Le bois étant généralement scié vert, les sous-produits de première transformation sont humides.

Ces produits peuvent être classés en trois grandes familles : **les écorces, les sciures et copeaux, les chutes courtes et longues qui seront déchetées en plaquettes.**

Les entreprises de la **deuxième transformation** du bois, notamment les menuiseries, produisent des sciures et de copeaux secs, ainsi que des chutes courtes, également transformables en plaquettes ou alors brûlées dans des installations manuelles. Les sciures et copeaux peuvent être brûlés directement, ou être aussi compressés en **briquettes ou granulés**



Les écorces

L'écorçage est effectué la scierie et peut représenter jusqu'à 15 % du volume de la grume chez certains résineux. Avec la valorisation en paillage et terreau, le principal débouché des écorces est la combustion.

Elles ont une masse volumique de 650 à 800 kg/m³ pour du résineux et de 450 à 650 kg/m³ pour du feuillus à une humidité de 15% à 20%. Leur contenu énergétique est en moyenne de 1600 à 2800 kWh par tonne pour une humidité de 40 à 60%. Les écorces sont utilisées dans des chaufferies de puissance supérieure à 1 MW (chaudières alimentées par tapis ou chaînes à racleurs) dans l'entreprise ou dans des chaufferies collectives.

Les copeaux et sciures

La granulométrie des copeaux et des sciures varie selon les outils utilisés. La sciure est généralement captée par aspiration et stockée en silo. En scierie on humidité initiale est celle du bois scié (entre 45 et 65 %). Elle se conserve peu de temps avant de s'abimer par moisissure. On peut distinguer des sciures "propres", aspirées directement au dessus des machines et les sciures "sales", récupérées à même le sol et souvent mélangées à des corps étrangers et des écorces. Les sciures propres peuvent être valorisées après séchage dans la fabrication de granulés à usage énergétique (compression). Les produits secs se conservent quant à eux très bien, sont granulables ou briquetages directement, ou peuvent être utilisés sur place en chaudière à vis ou à insufflation.

Le contenu énergétique des sciures & copeaux est en moyenne de 4400 kWh par tonne pour une humidité de 10 à 15 %. Le contenu énergétique des sciures humides est en moyenne de 1600 à 2800 kWh par tonne pour une humidité de 40 à 60 %.



Les plaquettes de scieries

Les chutes de tronçonnage, nez de sapin, dosses, délignures, noyaux de déroulage, chutes de découpe de petites dimensions, doivent être broyées sous forme de plaquettes avant d'être utilisés en chaufferie. Les dosses et délignures fraîches ont une masse volumique de 320 à 350 kg/m³ pour du résineux et de 400 à 450 kg/m³ pour du feuillus.

Le contenu énergétique de ces plaquettes est en moyenne de 2200 à 3300 kWh par tonne pour une humidité comprise entre 30 et 50%.

Ce sont des produits peu épais qui sèchent rapidement et naturellement, et qui se conservent très bien. Le broyage des chutes courtes nécessite des broyeurs particulier à cisailles rotatives.

Proportion volumique des produits connexes de scierie par rapport à une grume sur écorce [Source CTBA]

Première Transformation	Ecorces	Sciures	Dosses et délignures	Chutes de tronçonnage	Total des sous produits
Chêne	10.9 %	9.2 %	25.7 %	6.2 %	52 %
Hêtre	6.5 %	7.2 %	19.9 %	3.4 %	37 %
Peuplier	10.4 %	13.9 %	21 %	1.7 %	47 %
Feuillus divers	9.7 %	11.1 %	17.5 %	5.2 %	44 %
Sapin-épicéa	9.0 %	9.7 %	20.1 %	2.2 %	41 %
Pin sylvestre	12.1 %	11.1 %	18.4 %	1.5 %	52 %
Pin maritime	21 %	12.1 %	20.2 %	1.6 %	46 %



Les briquettes ou bûches compactées

Elles sont fabriquées à l'aide d'une presse à partir de copeaux et de sciures sèches ou séchées de scieries ou d'entreprises de la seconde transformation du bois. Elles se présentent sous la forme de cylindres ou de volumes de 7 à 10 cm de diamètre et de 20 à 30 cm de longueur. Leur poids unitaire varie de 1 à 2 kg. Leur contenu énergétique est en moyenne de 4600 kWh par tonne pour une humidité de 8 à 10 % sur brut.

Elles s'utilisent comme des bûches classiques pour le chauffage domestique mais aussi en pizzerias, boulangeries et restaurants. C'est un produit idéal pour les usagers ayant peu de place de stockage, consommant le bois de manière non régulière ou habitant dans les étages par exemple.



Les Granulés

Les granulés sont des cylindres de sciure compressé de 6 à 9 mm de diamètre et de 3 cm de longueur maximum qui sont utilisés comme combustible pour le chauffage automatique.

Ce combustible très dense dispose d'un pouvoir calorifique minimum de 4600 kWh par tonne avec une humidité sur poids brut de 8 %. Sa masse volumique est de 0,7 t/m³ ce qui facilite le transport et le stockage.

Les granulés peuvent être livrés par camion souffleur ou conditionnés en sacs. Les granulés s'utilisent dans des poêles à granulés et dans des chaudières automatiques spécifiques, principalement dans des petites puissances.

Sa régularité en fait le combustible le plus facile à utiliser et le plus performant au niveau énergétique.

Les combustibles bois issus de la récupération

Les bois de rebut sont par définition les bois "en fin de vie" ou usagés. Ils ont plusieurs origines :

- les usines de seconde transformation du bois,
- les déchetteries (meubles, huisseries : déchets des particuliers)
- les entreprises du bâtiment (chantiers et de démolition, coffrages,...)
- la collecte des emballages (palettes, caquettes, caisses : déchets des entreprises et commerces).

On distingue trois grandes catégories de bois de rebut :

- ✓ les bois non traités : bois n'ayant subi que des transformations mécaniques mais pas de traitement chimique. Ils peuvent être utilisés dans des chaufferies automatiques au bois sans contraintes sur le traitement des fumées, mais quand même après déferrailage. Ce sont les palettes, caisses et caquettes non traitées, les planches brutes,
- ✓ Les bois ayant reçu un traitement ou ajout chimique : colles, peintures, revêtements, traitements. Ces bois peuvent être valorisés dans des chaufferies au bois mais avec des contraintes sur le choix de la technologie de chaudière et sur le traitement des fumées. Ce sont les bois agglomérés, les meubles et bois de construction.
- ✓ Les bois ayant été traités et contenant des métaux lourds, de la créosote ou des composés organo-halogénés. Ces déchets sont des déchets industriels spéciaux et doivent suivre des filières spécifiques d'élimination comme l'incinération. Ce sont notamment les traverses de chemin de fer, les poteaux porteurs de câbles, les mobiliers extérieurs et certains bois de construction



Une plate-forme de conditionnement spécifique est nécessaire pour fabriquer du combustible à partir de bois de rebut. Elle se compose d'un pré-broyage grossier à vis ou à fléaux, d'un broyage fin à cisailles ou à marteaux, d'un dé-ferrailage, voire d'une dé-métallisation complète et d'un criblage.

Le contenu énergétique du broyat de bois de rebut est en moyenne entre 3300 à 3900 kWh/t pour une humidité de 20 à 40 %.

Le bois de rebut s'utilise dans des grosses chaudières avec foyer à grilles, des chaudières co-combustion avec foyer à lit fluidisé et dans les usines d'incinération.

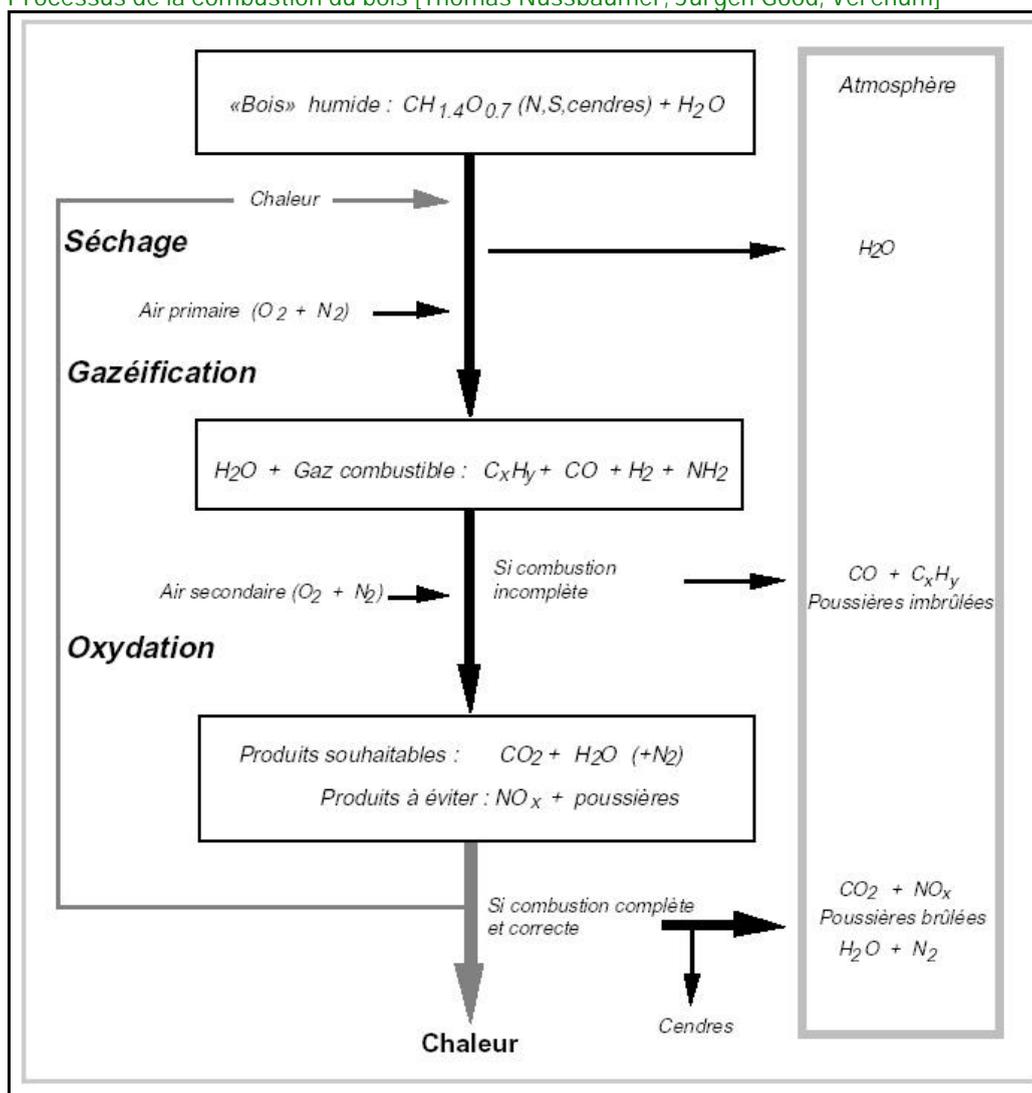
LA PRODUCTION D'ÉNERGIE

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 thermochimique 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 :
Biomasse = combustible = CO₂ + H₂O + cendres + énergies

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.

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 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 causent 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 accules assez élevés car les pertes par rayonnement servent directement au chauffage des locaux.

Les applications

Les applications dans le secteur domestique

Le chauffage de l'habitat individuel 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.

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 composé de 3 éléments principaux :

- ❑ la centrale de production de chaleur : elle peut être réalisée en un 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 nombreuses avantages, ils permettent de mutualiser les investissements des utilisateurs, d'exploiter la chaufferie par un professionnel et ainsi avoir un meilleur suivie 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 intéressante car ce sont des utilisations très consommatrices sur des durées importantes. Le recours à un combustible local et bon marché est gage d'intérêts 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 existent des technologies adaptés 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

Le chauffage de serres agricoles : La chaleur produite à partir de la biomasse peut être distribuée pour les cultures en serres. La proximité d'une ressource biomasse facilite souvent ce recours. L'intérêt réside cependant surtout du niveau économique du combustible biomasse car ces installations sont très consommatrices

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 çà 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.

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.

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, scintrage, 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 est donc à 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 : La production à partir d'une chaudière et d'une turbine à vapeur, à partir d'une chaudière et d'un moteur à vapeur, avec Cycle Organique de Rankine et la production par cycle combiné (cycle gaz et cycle vapeur)

L'évaporation et le séchage : L'évaporation de l'eau est avec la cuisson et la sidérurgie l'un des plus ancienne application 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.

La torréfaction : Principalement dans les pays en voie de développement, la biomasse est utilisée dans l'industrie agroalimentaire pour la torréfaction du café ou du cacao. Certaines sociétés proposent des torrificateurs 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.

CHIFFRES CLES

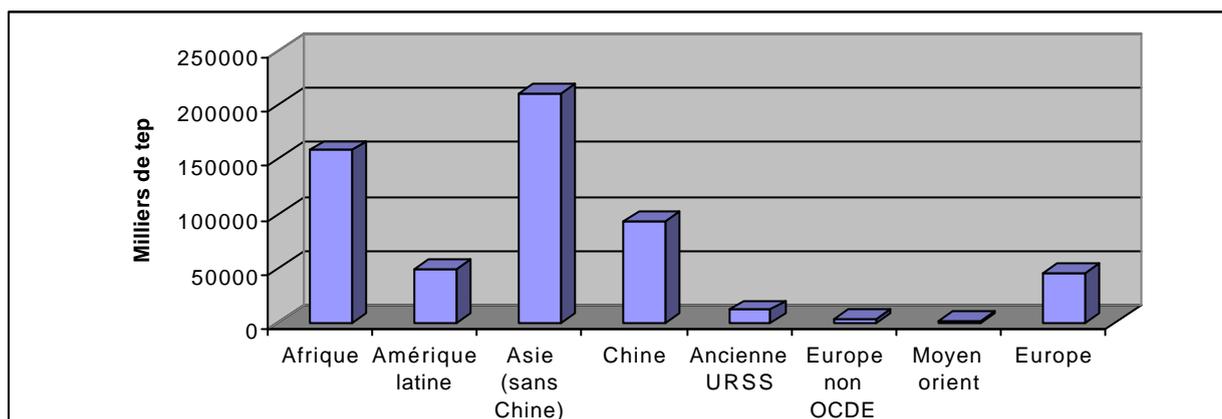
La ressource en bois-énergie dans le monde

La superficie de la forêt recouvre **3 890 millions d'hectares dans le monde**, soit un tiers de la surface émergée, dont 95% de forêts naturelles et 5% de forêts de plantation. La répartition des forêts est la suivante : 47% de forêts tropicales, 9% de forêts subtropicales, 11% de forêts tempérées et 33% de forêts boréales. Le type de forêt dépend du climat et du sol. La majorité du couvert forestier se situe dans l'hémisphère nord. Il se compose d'un tiers de résineux et de deux tiers de feuillus. La déforestation s'intensifie dans les pays en développement autour de toutes les villes d'Amérique du Sud, d'Afrique et d'Asie. Le taux de déboisement mondiale s'élève à **14,6 millions d'hectares par an**. L'accroissement mondiale de la forêt est de **5,2 millions d'hectares par an** pour les surfaces forestières, principalement dans les pays industrialisés. Les forêts des pays industrialisés contiennent 188 milliards de mètres cubes de volume sur pied dont près de la moitié en Russie. Une grande partie n'est pas exploitable de 15% à 60% selon les pays, pour des raisons économiques ou de protections de la forêt.

Les forêts représentent un stock de biomasse ligneuse de plus de **420 000 millions de tonnes**. Néanmoins, une utilisation durable de la biomasse à usage énergétique ne doit pas faire appel à ce stock, mais à l'accroissement annuel de la production. Le gisement mondial de bois-énergie est suffisamment important pour permettre une utilisation rationnelle à grande échelle, en substitution des énergies fossiles. [Source FAO 2000]

La consommation de bois-énergie dans le monde

Le bois-énergie est la principale source d'énergie des pays en voie de développement avec 50,5 % de la consommation mondiale pour l'Asie et 26,5 % pour l'Afrique et 9,6 % pour l'Amérique du sud. Cette forte demande en « bois de feu » pose des problèmes dans les pays en voie de développement.



Exemples de la production de bois-énergie dans le monde (source IEA)

La consommation de bois-énergie en Europe des 15

L'Union Européenne place le bois-énergie à un des premiers plans en matière d'approvisionnement énergétique future. Elle a comme objectif indicatif à l'horizon 2010, de faire **12 % de sa consommation intérieure brute d'énergie** à partir de sources d'énergies renouvelables. La puissance visée pour le chauffage bois-énergie est de **10 000 MWth**, soit **4,5 MTEP en plus**. Ce qui correspond à environ un million de logements chauffés par le bois au moyen de chaudières à bois individuelles, de chauffages collectifs et de chauffages urbains.

En 2000, la consommation de bois-énergie était de **47,3 MTEP** pour les pays de l'Union Européenne dont 85% pour des usages thermiques, et 29,6 TWh pour les usages électriques. La consommation de bois-énergie correspond à **6,3 % de la production d'énergie primaire** de l'Union Européenne, mais elle ne couvre que 2 % de la consommation d'énergie de l'Union Européenne. La production d'énergie primaire à partir du bois a augmenté de 1 million de TEP de 1999 à 2000.

Figure 26 - Tableau : Production d'énergie primaire, part du bois-énergie dans l'Union européenne [Source : EUROSTAT, guide statistique de l'Europe, données 1989-1999 - EurObserv'ER 2001]

	Population	Production totale d'énergie primaire	Production de bois énergie en 2000	Part du bois-énergie
	en milliers hab.	en millions de tep*	en millions de tep*	En %
Pays Bas	15 735	62,7	0,5	0,8 %
Irlande	3 705	2,5	0,2	8 %
Danemark	5282	20,2	0,9	4,46 %
Royaume Uni	58 974	269,1	1	0,37 %
Espagne	39 634	31,3	3,6	11,5 %
Belgique et Lux.	10 579	12,2	0,3	2,46%
Italie	57 343	34,5	4,6	13,33 %
France	58 886	120,7	9,8	8,12 %
Allemagne	82 178	131,7	5	3,8 %
Portugal	9 873	3,6	1,7	47,22 %
Autriche	8 177	9,4	3	31,91 %
Grèce	10 626	10,1	0,9	8,91 %
Suède	8 892	30,2	8,3	27,48 %
Finlande	5 165	13,1	7,5	57,25 %
Total	375 049	751,3	47,3	6,30 %

*Tep : tonne équivalent pétrole

Les efforts de développement portent surtout sur les chaufferies collectives et les réseaux de chaleur, grâce à la mise en place de plans de soutien adaptés et des conditions climatiques (Autriche, Danemark, Finlande, Suède). Le potentiel de développement de chaufferies automatiques au bois se situe surtout dans les zones éloignées des réseaux de distribution du chauffage urbain et du gaz naturel.

Les efforts de développement portent peu sur le chauffage individuel, puisque plus de 85 % des logements de l'Union Européenne sont déjà chauffés par des systèmes individuels. Néanmoins, ce marché devrait progresser, grâce à l'amélioration des performances des nouveaux matériels.

PETIT GLOSSAIRE DU BOIS-ENERGIE

Affouage : La mise à disposition pour les habitants d'une commune, appelés affouagistes, de bois provenant des forêts communales, pour la satisfaction de leurs besoins personnels, et ceci pour un prix avantageux.

Agent de liaison : Substance utilisée pour faciliter la consistance des combustibles à bois comprimé. Son utilisation doit être restreinte à des substances organiques non polluantes, comme l'amidon.

Biocombustibles : Différents types de biomasses utilisées pour la combustion

Bioénergie : La bioénergie est un terme générique qui couvre l'ensemble des sources d'énergies issues de la biomasse (combustibles bois, pailles, tourbe), les biocarburants (éthanol-diester issus de l'agriculture) et le biogaz (méthanisation des déchets organiques).

Biomasse : La biomasse est un terme qui désigne, au sens large, l'ensemble des produits organiques solides ou liquides qui proviennent de matières vivantes végétales ou animales, et qui sont susceptibles d'être utilisés à des fins énergétiques (bioénergies) ou agronomiques..

Bocage : Système agricole ou paysagère constitué par des haies, clôtures faites d'arbres et d'arbustes alignés qui marquent la limite entre deux parcelles ou propriétés agricoles.

Bois déchiqueté: Le bois déchiqueté ou les plaquettes sont du bois réduit en petits morceaux fluides pour alimenter des chaudières automatiques. Ce combustible bois obtenu à partir de branches issues de l'exploitation forestière, l'élagage, l'industrie du bois ou la récupération de bois de rebut.

Bois de rebut : Les bois de rebut correspondent à des produits en bois "en fin de vie" ou usagés. : les bois de rebuts non souillés qui peuvent être utilisés dans des chaufferies bois : les palettes, caquettes, caisses, ... et les bois de rebut souillés ou les bois traités doivent être incinérés comme des déchets.

Bois dur : Le bois dur est un bois résistant, dense, lourd, généralement feuillu et avec un contenu énergétique important, par exemple les fruitiers, le charme, le chêne et le hêtre. Certains résineux comme l'if ou le pin sylvestre peuvent également être durs.

Bois ronds d'industriels : Bois jadis utilisés pour l'étagage des mines, et désormais utilisés en trituration, panneaux et papier.

Bois tendre : Le bois tendre est un bois peu dense, léger et avec un faible contenu énergétique, par exemple le tilleul, le peuplier et les résineux en général.

Brique : Les briquettes ou bûches compactées ou encore bûchettes reconstituées sont fabriquées à l'aide d'une presse à partir de copeaux et de sciures des scieries et des entreprises de la seconde transformation du bois. Elles se présentent généralement sous la forme d'un cylindre de 10 cm de diamètre et de 30 cm de longueur.

Bûche reconstituée : voir brique

Camion souffleur : Camion utilisé pour approvisionner des granulés ou des plaquettes en vrac grâce à un système pneumatique qui souffle les particules dans les silos des chaufferies automatiques.

Cellulose : Polysaccharide structurel présent dans les tissus végétaux.

Cendre : Résidu solide demeurant après la combustion de matériaux carbonés. Les cendres sont constituées des matières minérales contenues dans le produit, des impuretés accrochées aux écorces et de particules de charbon de bois (carbone pur).

Chaudière biomasse : Chaudière utilisant de la biomasse comme source d'énergie.

Chaufferie collective : Chaufferie qui alimente en chauffage plusieurs bâtiments

Chutes : Produits connexes issus du sciage du bois : dosses, délignures et chutes coutes.

Cogénération bois : Production combinée de chaleur et électricité grâce à la combustion du bois.

Copeaux : Produits connexes secs de petite taille issus du rabotage du bois.

Cycle du carbone : Parcours réalisé par le carbone dans le temps, à travers des différents états, comme CO₂ de l'air, et comme carbone organique dans les plantes ou dans le sol.

Déchiqueteuse : Machine équipée de couteaux et qui sert à couper les branches en plaquettes, lesquelles peuvent être utilisées pour l'alimentation des chaudières automatiques.

Développement durable : Concept du développement issu de l'association des dimensions de l'environnement, du social, du développement et de l'économie.

Durée de reconstitution d'un combustible : Temps que prend la nature pour renouveler un combustible qui a été utilisé.

Eclaircie : Elimination des arbres les moins intéressants d'une plantation ou d'une forêt afin de favoriser la croissance des arbres restants.

Ecorce : Tissu extérieur des arbres qui est éliminé avant le sciage du bois d'œuvre et qui peut servir pour l'alimentation des chaudières bois automatiques.

Effet de serre : Phénomène de réchauffement de la planète induit par des gaz qui la rendent opaque au rayonnement infra-rouge émis par la terre.

Energies fossiles : Energies issues de ressources naturelles de la planète datant de centaines de millions d'années, leurs réserves sont limitées. Leur usage réinjecte dans l'atmosphère des gaz à effet de serre capturés par les organismes vivants à une époque où l'atmosphère était beaucoup plus chargée qu'aujourd'hui.

Energies renouvelables : Energies issues de systèmes dont la ressource énergétique est naturellement reconstituée, n'altérant l'équilibre environnemental ni augmentant l'effet de serre.

Esence : Type de bois qui correspond à une espèce végétale.

Feuille : Arbre qui appartient à la classe des angiospermes, qui manque de conduits résinifères et dont les feuilles sont généralement renouvelées tous les années.

Futaie : Formation forestière âgée dont les tiges des arbres sont issues de plantation ou de semis épanchés naturellement ou artificiellement.

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 issus de la pyrolyse du bois. La gazéification du bois est obtenue en présence d'un mélange de vapeur et d'oxygène.

Granulés : Les granulés sont des cylindres de bois compressé de 6 à 9 mm de diamètre et de 3 cm de longueur maximum et qui sont utilisés comme combustible pour le chauffage automatique.

Granulométrie : Dimensions des fragments qui constituent le combustible bois déchiqueté ou broyé.

Industries de la 1^{ère} transformation du bois : sont les entreprises qui transforment le bois vert, essentiellement les scieries. Elles produisent l'essentiel des produits connexes

Industries de la 2^{ème} transformation du bois : Sont les entreprises qui transforment le bois déjà scié et sec, essentiellement les menuiseries.

Insert : Foyer fermé adapté à l'équipement des cheminées à foyer ouvert, ou âtres.

Lignine : Molécule structurale des tissus végétaux qui est abondante dans le bois. C'est elle qui en fondant sous l'effet de la chaleur colle les sciures dans la fabrication des briquettes et des granulés.

Livre blanc des énergies renouvelables : Document intitulé Le Livre blanc de la Commission européenne : "Energies pour l'avenir : les sources d'énergies renouvelables" qui fixe la contribution des énergies renouvelables à 12 % de la consommation énergétique intérieure brute à l'horizon 2010, ce qui suppose de tripler la consommation de biomasse.

MAP : Mètre cube apparente : Unité utilisée pour mesurer les combustibles bois qui représente la quantité de combustible contenu dans un cube de 1m de côté.

Panneaux bois : Terme qui regroupe toutes les planches issues de la compaction du bois

Photosynthèse : la photosynthèse est un processus qui réalise la conversion directe de la lumière en énergie chimique sous forme de matériaux carbonés.

Plaquettes forestières : bois déchiqueté issu du déchiquetage de branches.

Plaquettes industrielles : bois déchiqueté issu du déchiquetage des chutes de l'industrie du bois.

Pouvoir calorifique inférieur (PCI) : quantité d'énergie dégagée par un combustible après avoir soustrait la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

Pouvoir calorifique supérieur (PCS) : quantité d'énergie totale dégagée par un combustible.

Protocole de Kyoto : Compromis mondial dont les participants s'entendent pour réduire entre 2008 et 2012 les émissions de six gaz à effet de serre de 5,2 % par rapport aux niveaux de 1990.

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.

Quartiers : Bûches de bois fendues

Rémanents forestiers : Produits résidus de l'exploitation forestière : branches et cimes.

Réseau de chaleur : Installation comprenant une chaufferie fournissant de la chaleur à plusieurs clients, par l'intermédiaire de canalisations de transport de chaleur.

Résineux : Arbres qui produisent de la résine.

Rondins : bûches non fendues.

Stère : lot de bûches de 1m de long, empilées de façon à constituer un cube de 1 m de hauteur.

Taillis : Ce mode de traitement d'un peuplement forestier consiste à couper tous les arbres au ras du sol tous les 20 à 25 ans. Les brins obtenus sont donc issus de souche.

Taux d'humidité : Contenu en eau d'un combustible bois. Il est mesuré en pourcentage du poids d'eau par rapport au poids total du combustible.

Tonnes équivalentes pétrole (TEP) : unité de mesure couramment utilisée par les économistes de l'énergie pour comparer les énergies entre elles. C'est l'énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole moyen.

Sciures: Sous-produit de granulométrie très fine issu du sciage du bois.

UNITES & CONVERSIONS

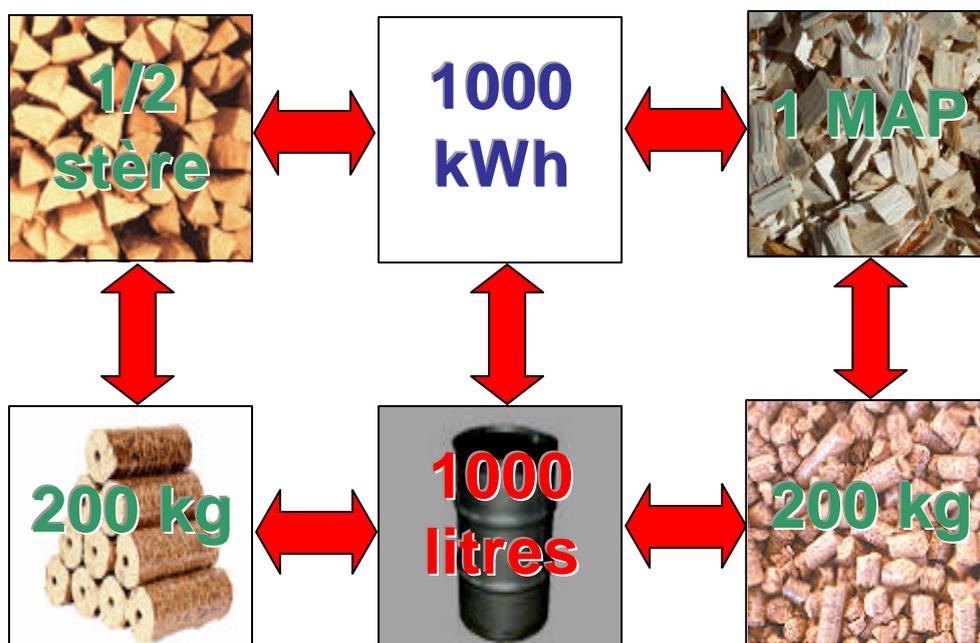
Les unités dérivées du système international

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

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



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	4.179×10^4	1

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 0.5 m ³ plein bois 2/3 m ³ Stères 220 kg granulés 500 kg écorces 88 m ³ gaz naturel 78 kg propane 100 l fioul 1000 kWh	42 GJ 1163 l fioul 4500 kW électricité 3 t bois sec 1,5 t charbon 13 000 kWh PCS gaz naturel 0.91 t propane 3.496 t paille sèche

Les conversions entre unités

1 ... équivalent 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	$0,086 \cdot 10^{-3}$	$3,412 \cdot 10^{-3}$	1	0,086	$630,4 \cdot 10^{-6}$
1 m ³ de gaz *	0,041855	10^{-3}	0,03968	11,628	1	$7,33 \cdot 10^{-3}$
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 Therm anglais**, unité utilisée par la bourse de Londres pour la cotation du gaz NBP équivaut à : 29,31 kWh, soit 0,1 Mbtu

ITEBE EDITIONS

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.

Vidéos



1. Le bois-énergie Maintenant !
2. Le chauffage automatique au bois

Disponible en français, anglais et allemand

Revue BOIS ENERGIE



En 3 langues : français, anglais, italien ou allemand
Rubriques : actualité, portraits, chauffage, combustibles, stratégies, cogénération et dossiers thématiques

Annuaire ITEBE des professionnels du 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. La production professionnelle de 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. La production de plaquettes forestières
2. Production de plaquettes forestières et sécurité du travail
3. Les contrats d'approvisionnement pour les chaufferies automatiques au bois
4. Concevoir une chaufferie automatique au bois déchiqueté de moins de 300 kW
5. Concevoir un silo ou une trémie à bois déchiqueté
6. Envisager un réseau de chaleur au bois
7. La valorisation énergétique des bois souillés

[Fascicules téléchargeables au format PDF sur le site \[www.itebe.org\]\(http://www.itebe.org\) Espace Pro](#)



Fiches de réalisations de la Route du bois-énergie ®



- **Chaufferies et réseaux de chaleur** (dans des collectivités publiques ou privés, des industries du bois, dans l'agriculture, ...)
- **Plate-formes de production de combustible** (granulés, écorces, plaquettes forestières, bois de rebut, ...)

LES BONNES PRATIQUES DU BOIS-ENERGIE



ITEBE EDITIONS, 28 boulevard Gambetta, BP 149
F - 39004 LONS-le-SAUNIER Cedex
Tél. : +33 (0)384 47 81 00 - Fax : +33 (0)384 47 81 19
Email : info@itebe.org - Web : www.itebe.org