



Mémento aquitain du bois énergie

Synthèse N°6

Synthèse bibliographique

Les unités du bois- énergie

Octobre 2013

Les unités du bois-énergie

Objectifs :

- Connaître les unités du bois énergie.
- Clarifier les équivalences entre les unités.
- Présenter les méthodes de mesure.

Idées clés

- Nouvelles unités et nouveaux modes de vente pour le bois énergie, comparé aux autres industries du bois.
- Précautions d'usage des équivalences entre unités.

Sommaire

Objectifs :	2
Idées clés	2
Sommaire.....	2
1 Mesure de l'énergie et des rendements.....	3
1.1 La puissance (W)	3
1.2 L'énergie (Wh).....	3
1.3 Rendement énergétique.....	4
2 Valeur énergétique du bois.....	4
2.1 Le pouvoir calorifique du bois (PCI).....	4
2.2 Mesurer la masse et le taux d'humidité	5
2.3 Effet du séchage sur la valeur énergétique du bois	6
Conclusion	8
Bibliographie	8
ANNEXE	10

1 Mesure de l'énergie et des rendements

1.1 La puissance (W)

Une chaufferie se caractérise par sa consommation d'énergie mesurée en kilowattheures (kWh) mais aussi par sa puissance. **La puissance représente l'énergie maximale que peut produire le système par unité de temps.** La puissance s'exprime en Watt dans le système international (Bureau International des Poids et Mesures 2006). C'est une donnée importante car elle permet de calculer la consommation d'une installation lorsque l'on connaît le temps de fonctionnement (Cf. Figure 1).

1.2 L'énergie (Wh)

Les chaufferies au bois produisent de l'énergie sous forme de chaleur qui est distribuée aux utilisateurs et parfois transformée en énergie électrique. L'unité internationale de mesure de l'énergie est le Joule (J) mais en pratique, l'unité utilisée est le **kilowattheure** (kWh) ou le **mégawattheure** (MWh) à ne pas confondre avec le kilowatt (kW).

Un joule est l'énergie produite en une seconde par une puissance

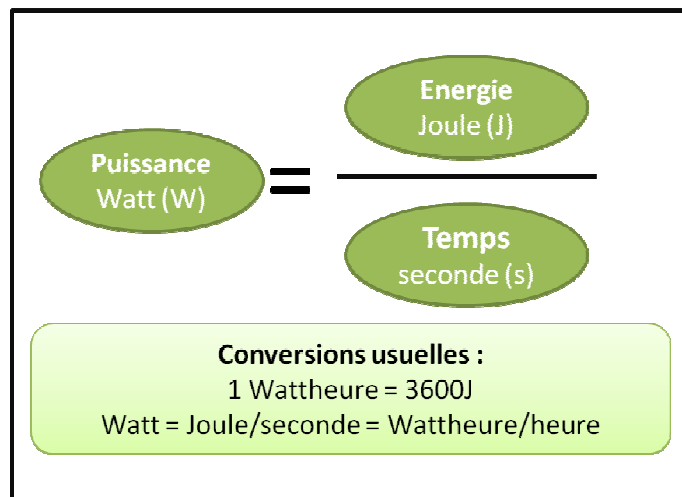


Figure 1- Relation entre puissance et énergie

d'un watt (1 J = 1 W.s) alors que le wattheure (noté W.h ou Wh) exprime l'énergie délivrée en une heure par cette même puissance d'un watt (donc 1 Wh = 3 600 J).

Un kilowattheure correspond à 1.000 wattheures et un mégawattheure (MWh) à 1.000.000 wattheures. Il arrive que les chaufferies apportent une précision sur le type d'énergie qu'elles produisent. On parle alors de kilowattheure électrique (kWh_e) ou de kilowattheure thermique (kWh_{th}).

Exemple :

Deux ampoules de 60 W restent allumées pendant une soirée dans la maison (soit 4 h) :

- Puissance = 2 * 60 watts = 120 watts (soit 120 Joules/seconde)
- Temps = 4 heures = 14.400 secondes
- Energie consommée = 4 h * 120 watts = 480 wattheures = 0,48 kWh = 1.728.00 joules

Les fournisseurs d'électricité facturent la consommation d'énergie en kilowattheure. Ainsi pour un prix de 0,12 € le kWh, le coût s'élève à un peu moins de 6 centimes d'euros pour deux lampes allumées

sur 4 heures.

1.3 Rendement énergétique

La chaleur produite par la combustion de la biomasse n'est pas récupérable à 100 % avec les technologies actuelles car il y a des déperditions à prendre en compte. Le rendement énergétique est le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie produite lors de la combustion. Le rendement des installations de combustion de biomasse modernes se situe entre 70 et 90 % (Cf. Tableau 1). Cet aspect est essentiel pour la rentabilité des chaufferies.

Tableau 1 Rendements énergétiques obtenus par différents types d'appareil de combustion de bois

Type d'appareil de combustion bois	Rendement énergétique (%)	
	Anciens	Récents
Cheminée	10-20%	
Poêle à bois	40-50%	60-80%
Poêle de masse		70-85%
Poêle à granulés		80-90%
Insert	40-50%	60-70%
Chaufferies industrielles et collectives biomasse		70-90%

Exemple des chaufferies installées sur le territoire du SIPHEM (Syndicat Mixte Interterritorial du Pays du Haut Entre deux Mers) :

- Puissance chaudières bois = 2,3 MW
- Rendement des installations = 74 %
- Quantité annuelle d'énergie livrée aux utilisateurs= 4.200 MWh

Certaines grosses installations utilisent la chaleur produite pour faire tourner une turbine et produire ainsi de l'électricité, l'autre partie de l'énergie est valorisée sous forme de chaleur ; cette double valorisation s'appelle cogénération. Lorsque la chaleur est utilisée en continu (process industriels) les rendements globaux peuvent être de 70-90%. Par contre une valorisation unique en électricité fait chuter le rendement global à 15-30%.

2 Valeur énergétique du bois

2.1 Le pouvoir calorifique du bois (PCI)

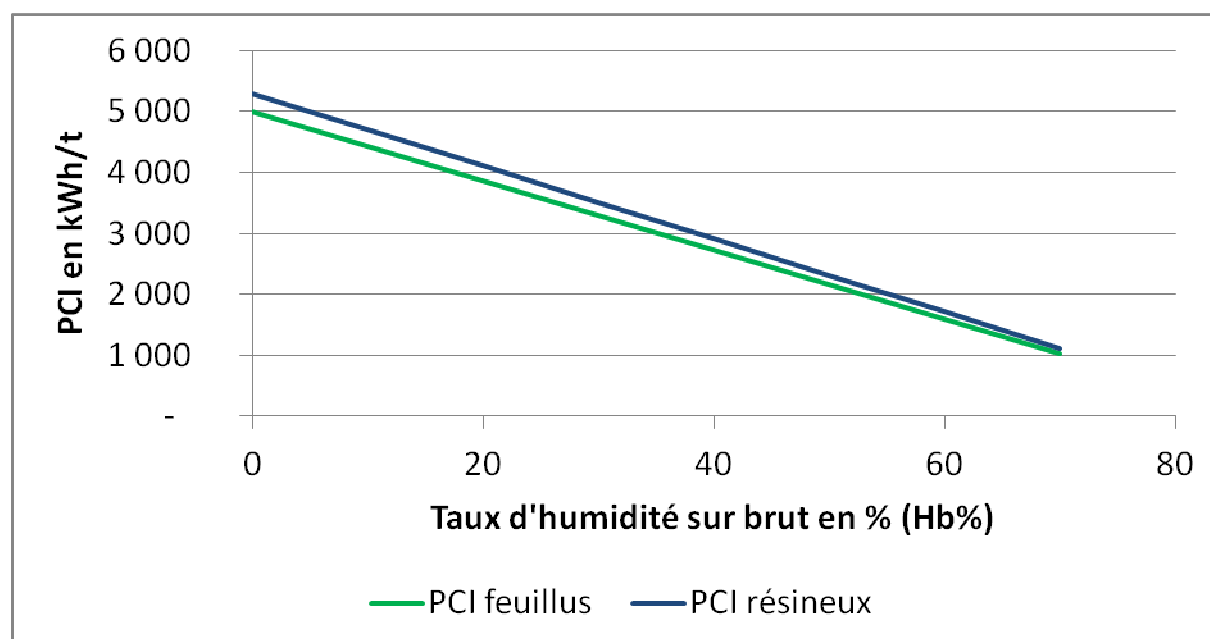
Le pouvoir calorifique correspond à la quantité d'énergie (par unité de masse ou de volume) dégagée par la combustion du bois. Il existe deux types de pouvoirs calorifiques (FCBA 2008) : le pouvoir calorifique supérieur¹ (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur² (PCI). Les

¹ Pouvoir calorifique supérieur (PCS) : valeur de l'énergie mesurée lors de la combustion du bois, avec la prise en compte de la chaleur latente de vaporisation de l'eau. L'énergie utilisée pour

praticiens du bois énergie utilisent le PCI. Concrètement, le PCI mesure la quantité maximale d'énergie par unité de masse récupérable lors de la combustion du bois, sans condensation des fumées. Le PCI s'exprime en kWh/t. Il varie en fonction du taux d'humidité du bois (voir graphique ci-dessous). **Plus le bois est sec, plus sa valeur énergétique est élevée. Une même quantité de bois a une valeur énergétique qui augmente au fur et à mesure du séchage. Le PCI varie peu en fonction de l'essence utilisée. Les résineux ont un PCI sensiblement supérieur à celui des feuillus.**

Concrètement, le PCI n'est pas mesuré directement mais est calculé³ à partir du taux d'humidité du bois (humidité du bois sur masse brute) et en tenant compte du type d'essence (feuillu ou résineux). Les différences de PCI entre essences résineuses et essences feuillues sont faibles et ne sont généralement pas prises en compte (les écarts existant entre essences sont inférieurs à l'incertitude des mesures).

Graphique 1 Evolution du PCI par tonne brute en fonction du taux d'humidité



2.2 Mesurer la masse et le taux d'humidité

La valeur énergétique d'un lot de bois se détermine en fonction de sa masse et de son taux d'humidité sur brut. Si l'on ne dispose que de données de volume (cas du cubage en forêt et

vaporiser l'eau n'est généralement pas valorisée, ce qui justifie l'utilisation d'un autre pouvoir calorifique : le PCI.

² Pouvoir calorifique inférieur (PCI) : valeur de l'énergie mesurée lorsque toute l'eau présente dans le combustible se trouve à l'état de vapeur. Le PCI et le PCS sont liés par la chaleur latente de vaporisation (L_v) selon l'équation suivante : $PCS = PCI + \text{masse eau} \times L_v$. Théoriquement, s'il était possible d'avoir un taux d'humidité nul (bois anhydre), le PCS et le PCI seraient identiques.

³ $PCI(Hb\%) = (PCI(Hb=0\%) \times (100 - Hb) / 100) - 6,8 \times Hb$

PCI (Hb%) : PCI à un taux d'humidité (Hb%) donné en kWh/t

PCI (0%) : PCI anhydre (au taux d'humidité = 0 %) en kWh/t

Hb : humidité du bois sur masse brute (exprimé en %)

Pour les résineux, PCI (0%) = 5.300 kWh/t

Pour les feuillus, PCI (0%) = 5.000 kWh/t

bord de route), il est nécessaire de convertir les volumes en masse en utilisant des coefficients de conversion (pour plus d'informations, se référer au mémento FCBA publié chaque année et disponible sur www.fcba.fr) :

- Masse volumique brute en kg/m^3 à un taux de siccité donné (siccité⁴ = masse de matière sèche / masse brute)
ex : pin maritime : 880 kg/m^3 à 47 % de siccité ; chêne : 950 kg/m^3 à 61 % de siccité
- Coefficients de foisonnement : volume réel / volume d'encombrement :
 - o Bois enstérés en longueurs de 2 m : 1,4 à 2 stères / m^3 ;
 - o Plaquettes de bois déchiqueté : 3 map (m^3 apparent) / m^3 .

L'évaluation de la valeur énergétique d'un lot de bois sur pied ou bord de route est très imprécise du fait de l'utilisation de coefficients et de la difficulté à anticiper le taux d'humidité au moment de l'utilisation du bois en chaudière. Une évaluation précise ne peut se faire qu'en mesurant la masse de bois et le taux d'humidité avant utilisation en chaudière.

Pour le bois énergie, l'humidité se détermine par le rapport entre la masse d'eau contenue dans le bois et la masse totale du bois (masse d'eau sur masse brute).

$$Hb\% = \frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse totale du bois}} \times 100$$

La masse d'eau se calcule par différence entre la masse totale du bois et sa masse anhydre :

$$\text{Masse d'eau} = \text{masse totale du bois} - \text{masse anhydre du bois}$$

Il existe une relation entre le taux de siccité et le taux d'humidité puisque le premier représente le pourcentage de la masse de bois alors que le deuxième représente le pourcentage de la masse d'eau. On obtient donc la relation suivante :

$$Hb\% + Ts\% = 100\%$$

En pratique, la masse de bois est mesurée par différence entre la masse des camions chargés et leur masse à vide. Le taux d'humidité se mesure en prélevant des échantillons que l'on pèse à l'état brut puis après séchage complet. Le séchage complet est obtenu par un passage en étuve pendant au moins 24 heures. Les praticiens utilisent souvent une méthode plus rapide (30 minutes) mais moins précise et non normalisée qui consiste à utiliser un four à micro-ondes pour sécher les échantillons.

2.3 Effet du séchage sur la valeur énergétique du bois

Si le PCI évolue avec l'humidité, c'est également le cas de la masse brute de bois. Lors du séchage d'un même lot de bois, sa masse brute diminue au fur et à mesure de l'évaporation de l'eau mais son PCI par tonne brute augmente plus rapidement. Le PCI total d'un lot de bois augmente lors du séchage.

⁴ La siccité représente le pourcentage de bois anhydre contenu dans un lot de bois. C'est le complément du taux d'humidité sur masse brute.

Pour connaître l'évolution de la masse brute d'un lot de bois lors du séchage, il peut être utile de déterminer la masse anhydre du lot :

$$\text{masse anhydre} = \text{masse brute} \times \left(1 - \frac{Hb\%}{100}\right)$$

Exemple d'un lot de chêne ayant un taux d'humidité sur masse brute de 40 % et une masse totale de 100 tonnes brutes. La masse anhydre est de $100 \text{ t} \times (1 - 40/100) = 60$ tonnes de matière sèche.

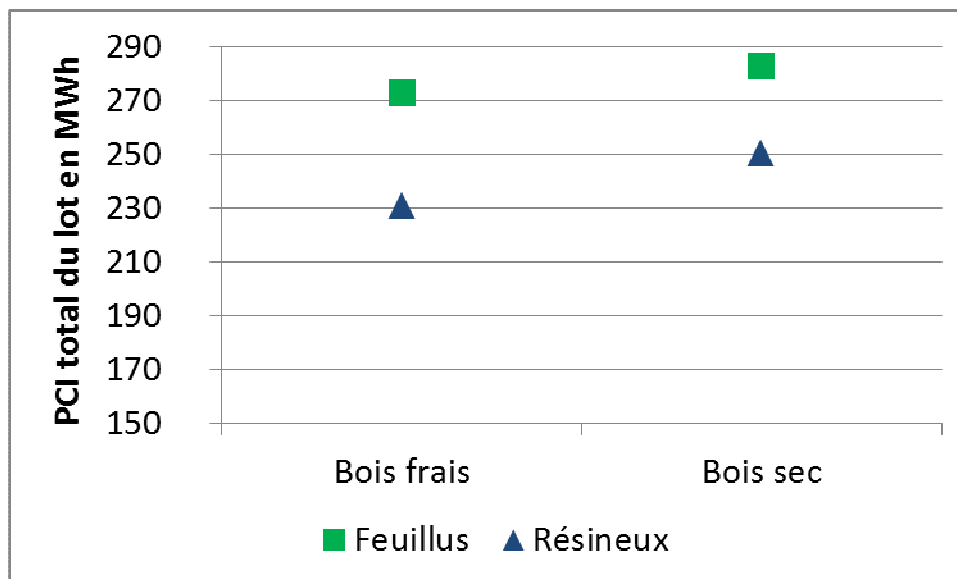
Pour calculer la masse brute d'un lot de bois après séchage, il suffit d'appliquer la même équation, avec le taux d'humidité sur masse brute après séchage :

$$\text{masse brute} = \frac{\text{masse anhydre}}{\left(1 - \frac{Hb\%}{100}\right)}$$

Suite de l'exemple : le lot de chêne est stocké plusieurs mois, son taux d'humidité sur masse brute diminue à 30 %. Sa masse brute, qui était de 100 tonnes au taux d'humidité de 40 %, évolue à $60 / (1 - 30/100) = 86$ tonnes brutes au taux d'humidité de 30 %, soit une perte de 14 % en masse brute. Dans le même temps, le PCI est passé de 2.728 kWh/tonne brute à 3.296 kWh/tonne brute. Le PCI du lot évolue donc de $100 \times 2.728 = 272,8$ MWh à $86 \times 3.296 = 282,5$ MWh soit un gain de 3,6 % en PCI.

Le même exercice appliqué à un lot de résineux, en général plus humide qu'un lot de feuillus après exploitation, montre que le PCI global d'un lot augmente de 8,4 % quand l'humidité diminue de 50 % à 30 %, alors que sa masse brute diminue de près de 30 %.

Graphique 2 Evolution du PCI total d'un lot de 100 tonnes brutes de bois frais lors du séchage (humidité évoluant de 40% à 30% pour les feuillus, 50% à 30% pour les résineux)



Grâce à ces calculs, il est possible de déterminer le gain économique apporté par le séchage en comparant le gain de recettes (en cas de vente au MWh) et le coût de l'opération de

séchage. **Lors des calculs de coût de revient du bois énergie, il est important de connaître l'humidité lorsque l'on utilise la tonne brute, ce qui est fréquent.** Ainsi, les prix d'abattage et de débardage sont parfois négociés à la tonne brute. Si l'on souhaite utiliser ces données, il convient de s'assurer si le prix a été défini pour du bois frais (cas général) ou du bois sec (plus rare). Pour un même chantier, le prix d'exploitation à la tonne de bois frais sera plus faible que le prix à la tonne de bois sec.

Conclusion

Lorsqu'on parle de bois énergie, on est amené à manipuler les unités de mesure de l'énergie et de puissance. Une quantité d'énergie se mesure en kilowattheures (kWh). Pour mesurer les quantités de bois énergie, la méthode la plus appropriée est de peser le bois et de mesurer son humidité. Cela impose d'accéder à une bascule et donc de déterminer ces quantités lors de la livraison du bois. En pratique, la quantité d'énergie que peut fournir un lot de bois se calcule à partir de sa masse totale et de son humidité qui déterminent le pouvoir calorifique inférieur (PCI) exprimé en kilowattheures par tonne brute de bois. Le PCI varie peu d'une essence à l'autre. On distingue en général les résineux des feuillus. Les résineux ont un PCI légèrement plus élevé. Le PCI augmente lorsque l'humidité diminue, alors que la masse totale diminue. Si on effectue des calculs économiques en se basant sur la tonne brute, il convient de tenir compte du niveau d'humidité des bois auxquels sont définis les prix unitaires. Un prix à la tonne brute établi pour des bois frais sera plus élevé lorsque les bois auront séché.

Bibliographie

Auvergne promobois. *Guide pratique du fabricant de combustibles pour chaudières bois automatique en Auvergne*. Lempdes: Clermont communauté.

Bureau International des Poids et Mesures. *Le système international-8ème édition*. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures, 2006.

CCI de la Lozère. «Aide-mémoire du fournisseur de bois-énergie en Lozère et dans le Gard.» Mende, 2010.

Chambre Régionale de Commerce et d'Industrie de Bourgogne. *Optimisez votre énergie – Guide pratique à destination des entreprises/Rappels scientifiques*. Dijon: Chambre Régionale de Commerce et d'Industrie de Bourgogne, 2009.

CRER. *Guide de projet d'une chaufferie à alimentation automatique au bois*. ADEME, 2010.

CRITT Bois-ADEME-Fibois. «Validation des méthodes de mesures des combustibles bois déchetés.» 2002.

FCBA. Mémento 2012. www.fcba.fr

FCBA. *Référentiel combustible bois énergie : les plaquettes forestières. Définitions et exigences*. ADEME, 2008.

RAEE. *Eléments méthodologiques et conseils pour la mise en oeuvre d'une chaufferie bois*.

Fiche N°1 : la chaufferie bois. RAEE, 2005.

SIPHEM, « Informations concernant les réseaux de chaleur installés sur le territoire du SIPHEM. », documents SIPHEM, 2013

Projet réalisé avec le soutien financier de :



ANNEXE : Conversion entre différentes unités du bois énergie

Valeur énergétique d'une tonne de bois en fonction de son humidité (kWh/tonne)

Source : « REFERENTIEL COMBUSTIBLE BOIS ENERGIE : LES PLAQUETTES FORESTIERES DEFINITION ET EXIGENCES » (ADEME, 2008)

Taux d'humidité (%)	PCI feuillus	PCI résineux
0	5 000	5 300
10	4 432	4 702
20	3 864	4 104
30	3 296	3 506
40	2 728	2 908
50	2 160	2 310
60	1 592	1 712
70	1 024	1 114

PCI : pouvoir calorifique inférieur

Bois vert	
Bois sec	

Plaquettes de bois déchiqueté (sources : mémento FCBA 2013, CEEB 2013)

1 m³ réel de bois rond donne environ 3 MAP (m³ apparents) de plaquettes.

Poids d'un MAP : varie entre 250 et 350 kg selon l'essence, le degré de tassement des plaquettes, leur granulométrie et l'humidité.



Typologie retenue par le CEEB (Centre d'Etudes de l'Economie du Bois) pour les plaquettes provenant de bois forestiers broyés sur coupe ou sur plateforme de broyage :

- Petite granulométrie, humidité < 30 % : 3.700 kWh/t
- Moyenne granulométrie, humidité 30-40 % : 3.100 kWh/t
- Granulométrie grossière, humidité > 40 % : 2.550 kWh/t

Lien vers des outils de conversion sur internet (ITEBE – ADEME) :

http://www.biomasse-territoire.info/fileadmin/site_bioter/documents_bioter/fiches_pratiques_bois/ITEBE_Calculateur_tableur_conversion2004.xls

Exemple de calcul de conversion pour un lot de 100 t de plaquettes forestières de pin maritime de 35% d'humidité et de granulométrie moyenne

 TABLEUR DE CONVERSION POUR L'USAGE DES PLAQUETTES FORESTIERES			
Entrez votre quantité et choisissez l'essence, humidité et granulométrie		Entrez le prix unitaire connu de vos plaquettes forestières	
POIDS EN TONNE	100,0	SAISIE	Coût unitaire €/TONNE
PIN MARITIME [Pinus pinaster]		Conversion des prix unitaires	
35 % d'humidité		MWh PCI	17,92
ENTRE 30 ET 60 mm		MAP	19,22
Conversions volumiques		Tonne	56,80
Tonnes	100,0	GJoule PCI	4,98
Map	295,5	Calcul du prix de la quantité sélectionnée	
M3 plein	147,7	Prix	5 680,00 €
Contenu énergétique		Cette feuille de calcul a été réalisée par l'ITEBE avec le concours financier de l'ADEME. Elle est téléchargeable gratuitement sur le site www.itebe.org à la rubrique ITEBE-INFORMATION "Bonnes Pratiques"	
MWh PCI	317,0	 Agence de l'Environnement et de la Métrique de l'Énergie	
GJoule PCI	1141,2		
TEP PCI	27,26		