

5. Paramètres, unités et facteurs de conversion

Pour établir la qualité d'un *biocombustible*, il faut en décrire convenablement certaines propriétés. Les sources d'énergie et les produits énergétiques peuvent être mesurés en fonction de leur *masse* ou de leur *poids*, voire de leur *volume*, mais la donnée essentielle est leur *contenu énergétique*. Celui-ci doit être quantifié selon des paramètres énergétiques, à l'aide d'unités normalisées. Cette normalisation dans l'enregistrement et la présentation des unités originales est l'une des tâches premières des statisticiens de l'énergie et de la foresterie, et elle est un préalable à l'analyse ou à la comparaison des chiffres. Il est recommandé que, pour les besoins d'échange international des données et dans la mesure du possible dans les procédures de comptabilité nationale, les statistiques de l'énergie et de la foresterie soient enregistrées en suivant le Système international d'unités (abréviation officielle : SI).⁷ En outre, lors de l'enregistrement statistique de la consommation de charbon de bois, le rendement des processus de carbonisation doit être pris en compte.

5.1 Propriétés des biocombustibles

Les propriétés des biocombustibles les plus importantes dans la pratique sont l'*humidité*, la *teneur en énergie*, la *masse*, le *volume* et la *densité*, ainsi que la forme des *particules* et leur dimension (granulométrie), ou encore les *cendres totales*. Des données concernant les principaux *biocombustibles* figurent au tableau 9.

L'importance des autres propriétés des *biocombustibles* (à savoir leur teneur en différents éléments, la *fusibilité des cendres*) dépend du type de *biocombustibles solides*, des conditions propres à chaque usine de combustion, des mesures de réduction des émissions, etc. Pour la plupart des *combustibles ligneux* utilisés de nos jours, ces propriétés n'ont pas une importance primordiale pour l'utilisation des biocombustibles et elles ne doivent être prises en considération que dans certains cas.

5.1.1 Humidité

L'*humidité* des *biocombustibles solides* est très variable, car l'*humidité* des *combustibles ligneux* dépend du moment où ils ont été récoltés, du lieu, du type et de la durée d'entreposage et de leur préparation en tant que *combustible*. Elle peut être inférieure à 10 % (*sous-produits de l'industrie de transformation du bois*) ou atteindre jusqu'à 50 % (*copeaux de bois forestier*). L'*humidité* est un paramètre important à connaître pour établir non seulement le *pouvoir calorifique*, mais également les conditions d'entreposage, la température de combustion et, également, pour quantifier les gaz d'échappement.

Deux méthodes (*base sèche* et *base humide*) sont couramment utilisées pour spécifier l'*humidité des biocombustibles solides*. Il est important de ne pas les confondre, en particulier si l'*humidité* est élevée.

⁷ Voir le Bureau international des poids et mesures : <http://www.bipm.fr/fr/home/>

$$Humidité_{base\ sèche} = 100x\left(\frac{PoidsFrais - PoidsSec}{PoidsSec}\right) \quad (1)$$

$$Humidité_{base\ humide} = 100x\left(\frac{PoidsFrais - PoidsSec}{PoidsFrais}\right) \quad (2)$$

Dans les expressions ci-dessus, le **poids exprimé en base humide** renvoie au bois à l'état brûlé tel qu'il se trouve. Le **poids en base sèche** se réfère à un biocombustible séché selon un procédé normalisé. Les valeurs sont différentes et elles risquent, faute d'un éclairage suffisant, de donner lieu à de grandes erreurs de calcul. C'est pourquoi il est nécessaire d'indiquer le mode de mesure avec lequel on a mesuré l'humidité du *biocombustible solide* considéré. Dans la pratique, pour la plupart des *biocombustibles solides*, l'humidité est exprimée en base sèche.

Tableau 10 : Teneur énergétique et concentration de quelques éléments de la biomasse non traitée, comparées à celles du charbon

Type de biomasse	Humidité % en base sèche	Pouvoir calorifique net en MJ/kg	Cendres totales % en base sèche	Composés volatils
Épicéa (avec écorce)	20-55	18,8	0,6	82,9
Hêtre (avec écorce)	20-55	18,4	0,5	84,0
Peuplier (rotation courte)	20-55	18,5	1,8	81,2
Saule (rotation courte)	20-55	18,4	2,0	80,3
Écorce (résineux)		19,2	3,8	77,2
Paille de seigle		17,4	4,8	76,4
Paille de blé	15	17,2	5,7	77,0
Paille de triticales	15	17,1	5,9	75,2
Paille d'orge	15	17,5	4,8	77,3
Paille de colza	15	17,1	6,2	75,8
Paille de maïs	15	17,7	6,7	76,8
Paille de tournesol	15	15,8	12,2	72,7
Paille de chanvre	15	17,0	4,8	81,4
Paille de riz	15	12,0	4,4	
Balles de riz		14,0	19,0	
Coques d'arachide	3-10	16,7	4-14	
Parches de café	13	16,7	8-10	
Capsules de coton	5-10	16,7	3	
Coir (mésocarpe) de noix de coco	5-10	16,7	6	
Enveloppe de drupe du palmier à huile	55	8,0	5	
Seigle entier		17,7	4,2	79,1
Blé entier		17,1	4,1	77,6
Triticale entier		17,0	4,4	78,2
<i>Miscanthus</i>		17,6	3,9	77,6
Graine de seigle		17,1	2,0	80,9
Graine de blé		17,0	2,7	80,0
Graine de triticales		16,9	2,1	81,0
Graine de colza		26,5	4,6	85,2
Grignons (tourteaux) d'olives	15-18	16,7	3	
Épis de maïs	15	13,4	15-20	
Tiges de canne à sucre (bagasse)	40-50	8,0	4,0	80
Foin d'origines diverses		17,4	5,7	75,4
Déchets verts de voirie		14,1	23,1	61,7
Anthracite		29,7	8,3	34,7
Lignite	50	20,6	5,1	52,1

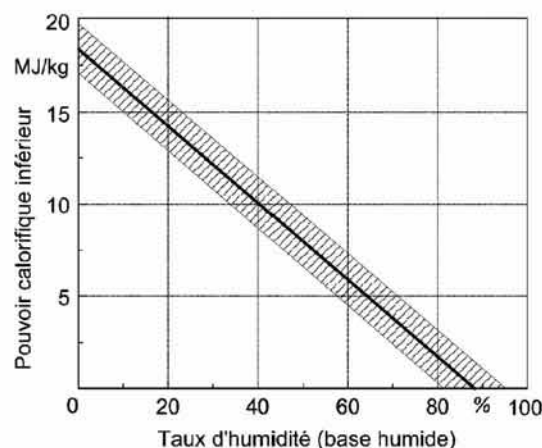
Source : Smith, K.R. ; Kaltschmitt, M. ; Thrän, D. 2001 [19].

5.1.2 Teneur en énergie

Dans la plupart des applications pratiques, le meilleur indicateur pour décrire la *teneur en énergie* des *biocombustibles* est le *pouvoir calorifique net*. Celui-ci dépend beaucoup de l'*humidité* du biocombustible considéré, ainsi que de la teneur du *combustible* en *hydrogène*. Le *pouvoir calorifique net* réel d'une *biomasse* ou *biocombustible* contenant un pourcentage connu d'eau peut être calculé à partir du *pouvoir calorifique net* de la *biomasse* anhydre, qu'on peut trouver dans la littérature. Dans l'équation 3, $H_{v(w)}$ représente le *pouvoir calorifique net* (en MJ/kg) de la *biomasse* avec une certaine *humidité*, $H_{v(wf)}$ le *pouvoir calorifique net* de la *biomasse* anhydre, et w l'*humidité totale* (en pourcentage). La constante 2,44 correspond à l'énergie d'évaporation de l'eau.

$$H_{u(w)} = [H_{u(wf)} (100 - w) - 2,44 w] / 100 \quad (3)$$

La figure 7 fait apparaître que le *pouvoir calorifique net* du bois diminue à mesure qu'augmente la teneur en *humidité* du *biocombustible*. Il passe ainsi d'environ 18,5 MJ/kg, à l'état anhydre, à une valeur nulle pour une *humidité* d'environ 88 %. Normalement, le bois séché à l'air a une *humidité totale* de 12 à 20 %, soit un rendement calorifique de 13 à 16 MJ/kg. Le bois fraîchement récolté se caractérise par une *humidité* en base sèche d'environ 50 % ou plus, d'où un *pouvoir calorifique net* médiocre.



Source : Smith, K.R. ; Kaltschmitt, M. ; Thrän, D. 2001 [19].

Figure 7 : Pouvoir calorifique net du bois en fonction de l'humidité totale

5.1.3 Masse, volume et densité

Deux rapports fondamentaux sont à considérer pour l'évaluation de la bioénergie, sans oublier que tant le **pouvoir calorifique** que la **densité** dépendent surtout de l'**humidité** du dendrocombustible considéré.

$$\text{énergie} = \text{masse} \times \text{pouvoir calorifique} \quad (4)$$

$$\text{masse} = \text{volume} \times \text{densité} \quad (5)$$

Les principaux paramètres d'intérêt sont les suivants :

La masse : certains *combustibles ligneux*, comme le *charbon de bois* et la *liqueur noire*, sont mesurés en unités de *masse*. Les principales unités de masse utilisées pour mesurer les produits énergétiques sont le kilogramme et la tonne métrique. La tonne métrique (égale à 1.000 kilogrammes) est la plus couramment usitée.

Le volume : les unités de *volume* sont les unités habituellement employées pour mesurer le bois rond et le *bois de feu*. Les unités de volume du SI⁸ sont le litre et le kilolitre, qui est équivalent au mètre cube. Même si le stère, unité de volume empilé qu'on considère généralement comme l'équivalent de 0,65 m³ solide, a été largement utilisé par le passé pour mesurer le *volume des combustibles ligneux*, les principales unités employées à l'heure actuelle sont des unités de **volume solide**, habituellement le mètre cube (m³). Les *copeaux de bois* et les *comprimés* (granulés cylindriques ou boulettes) sont généralement mesurés en unités de **volume apparent**, ils sont habituellement exprimés en mètres cubes (m³). Le tableau 11 présente les facteurs de conversion normalement employés pour la *masse*, le *volume solide* et le *volume apparent* du bois de feu.

Tableau 11 : Facteurs de conversion employés pour la comptabilisation du bois de feu

	masse (tonne métrique)	volume solide (m ³)	volume apparent (m ³)
masse (tonne métrique)	1,0	1,3-2,5	4,9
volume solide (m ³)	0,4-0,75	1,0	2,4
volume apparent (m ³)	0,2	0,6	1,0

Densité : La *densité* du bois (c'est-à-dire le poids par unité de volume) varie sensiblement selon les différents types et essences de bois. Les essences couramment utilisées comme *bois de feu* pèsent entre 650 et 750 kg/m³. Il est important d'observer l'influence de l'*humidité totale* sur la *densité* du bois. Plus il y a d'humidité par unité de poids, moins il y a de *combustible ligneux*. Il est donc impératif que l'*humidité totale* soit indiquée avec précision quand le *bois de feu* est mesuré par poids. Il existe deux types différents de *densité* à prendre en compte s'agissant de l'exploitation des biocombustibles solides :

la densité des particules est la *densité* de la matière constituant le biocombustible considéré. Il est utile de la connaître pour les calculs sur les processus de combustion (taux d'évaporation, densité énergétique, etc.), certains aspects relatifs à l'alimentation (matériel pneumatique nécessaire) et l'entreposage. La *densité particulaire (ou masse volumique)* des essences couramment utilisées comme *bois de feu* se situe entre 650 et 750 kg/m³. On ne peut la faire varier qu'en produisant des *biocombustibles comprimés*. La *densité particulaire* renseigne sur la qualité de ces produits. Ainsi, un granulé ayant une densité particulaire élevée est considéré de bonne qualité.

⁸ Système international d'unités.

Tableau 12 : Densité apparente type de quelques biocombustibles

biocombustibles ligneux		densité apparente (kg/m ³)	biomasse herbacée		densité apparente (kg/m ³)
bûches ou rondins(empilés)	hêtre	460	balles	paille	85
	épicéa	310		foin	100
copeaux de bois	résineux	195	bottes	paille, <i>Miscanthus</i>	140
	feuillus	260		foin	160
écorce	résineux	205	biocombustibles hachés	plantes entières	190
	feuillus	320		paille, <i>Miscanthus</i>	70
sciure		170		plantes entières	150
copeaux de rabotage		90			
granulés de bois		600	granulés de paille		500

la densité apparente est le rapport entre le matériel sec et son *volume apparent*. Il est utile de la connaître pour déterminer le *volume* nécessaire pour le transport et l'entreposage. C'est une donnée très importante pour le commerce et l'approvisionnement. La *densité apparente* varie considérablement selon les combustibles. On trouvera au tableau 12 des *densités apparentes* types pour différents biocombustibles

5.1.4 Cendres totales et point de fusion des cendres

La teneur en *cendres* des *biocombustibles solides* dépendent du type de *biomasse* et des *impuretés* qu'elle contient. Ce paramètre est important pour connaître le *pouvoir calorifique* et il détermine si le *biocombustible* est propre à être utilisé dans certaines usines de combustion. La teneur en *cendres* est toujours mesurée *en base sèche*. Les cendres sont le résidu solide obtenu après combustion complète. La teneur en *cendres* du *bois de feu* sont généralement de l'ordre de 1 %, mais certaines espèces d'*agrocombustibles* peuvent afficher un taux de *cendres totales* nettement plus élevé. Celui-ci est en rapport avec le pouvoir énergétique des *biocombustibles*, puisque les matières qui composent les *cendres* n'ont généralement aucun pouvoir énergétique. Ainsi, un *combustible ligneux* à l'état anhydre et contenant 4 % de *cendres totales* aura 3 % d'énergie de moins qu'une *biomasse* contenant 1 % de *cendres totales*.

Pour certains *biocombustibles*, il est souvent important de connaître le *point de fusion des cendres* pour les processus de combustion, car une température de traitement excessive entraîne la fusion des cendres et la dilatation des cendres en fusion, ce qui peut provoquer des avaries, d'où un surcroît d'entretien des dispositifs de combustion. La plupart des combustibles solides lignocellulosiques, comme la *biomasse herbacée* et les *cultures énergétiques* se caractérisent par un faible niveau du point de fusion des cendres. La *biomasse ligneuse*, quant à elle, ne pose généralement pas de problèmes de fusion des cendres.

5.1.5 Forme et dimensions des particules

Il est important de connaître la forme et les *dimensions* des particules ainsi que la *répartition granulométrique* des *biocombustibles solides* pour leur transport et leur manutention dans l'usine de conversion. Dans la pratique, on observe de nets écarts de forme et de dimensions entre les biocombustibles *broyés* (*farine de bois*), les biocombustibles *comprimés* (granulés de paille), les *biocombustibles coupés* (copeaux) et les biocombustibles *en balles* (balles de paille). À chacune de ces différentes formes correspond un équipement spécifique s'agissant de la production, du transport, de l'entreposage, de l'alimentation et de la combustion. Une fourchette *granulométrique* trop large peut être une source de dysfonctionnements dans les systèmes d'alimentation totalement automatisés : risques de "ponts", d'obstruction ou d'adhésion.

5.2 Rendement des processus de carbonisation

Tableau 13 : Quantité de bois de feu nécessaire pour produire du charbon de bois (en m³ par tonne de charbon de bois obtenue)

Type de four	Humidité du bois de feu (en %, base sèche)					
	15	20	40	60	80	100
Meule à carboniser	10	13	16	21	24	27
Four métallique portable	6	7	9	13	15	16
Four en brique	6	6	7	10	11	12
Four-cornue à charbon	4,5	4,5	5	7	8	9

S'agissant d'enregistrer statistiquement la conversion du *bois de feu* (ou des *combustibles ligneux*) en *charbon de bois*, il faut se pencher sur trois grands paramètres : la *densité* du bois, sa teneur en *humidité* et les moyens de production du *charbon de bois*. Le rendement du charbon de bois à partir du *bois de feu* selon les différents types de fours employés est exposé au tableau 13 (FAO, *Woodfuel Survey*, 1983). La FAO, dans ses statistiques (FAOSTAT), utilise un facteur de conversion de 165 kg de *charbon de bois* produits pour un mètre cube de *bois de charbonnage*. En d'autres termes, il faut environ 6 kg de bois de feu pour produire 1 kg de charbon de bois.

5.3 Facteurs de conversion

Le tableau 14 ci-dessous présente les principaux facteurs à utiliser s'agissant de dresser des bilans *bioénergétiques* pour divers types de *biocombustibles*. Y sont exposées les valeurs de *densité* de divers combustibles (donnée nécessaire quand on ne connaît que le *volume* du *biocombustible* considéré) et de *pouvoir calorifique* pour un taux d'*humidité* typique. Il convient de noter que l'objectif principal est de calculer la valeur énergétique du flux des *biocombustibles* exprimés en unités compatibles de *volume* ou de *masse*. À cet effet, il est conseillé d'employer les expressions (1) et (2) présentées plus haut, doivent être utilisées. Cependant, compte tenu des importants écarts observés dans les valeurs du *pouvoir calorifique* et du *volume* en fonction de la teneur en *humidité* du *biocombustible* dans les bilans énergétiques, il est préférable d'avoir recours au pouvoir calorifique des *biocombustibles* en *base sèche* et *hors cendres*.

Tableau 14 : Paramètres de base employés dans les bilans bioénergétiques

Biocombustible	Données primaires	Densité (en tonnes/m ³)	Pouvoir calorifique net (MJ/kg)	Humidité (en %, base sèche)
Combustibles ligneux directs	volume	0,725	13,8	30
Charbon de bois	masse, volume		30,8	5
Combustibles ligneux indirects	masse, volume	0,725	13,8	
Combustibles ligneux récupérés	masse, volume	0,725		
Combustibles dérivés du bois	masse	-		
Liqueur noire	masse			
Méthanol	masse		20,9	0
Biocombustibles non forestiers	masse	-		
Éthanol	masse		27,6	0
Sous-produits agricoles	masse		(voir tableau 9)	
Sous-produits d'origine animale	masse	-	13,6	
Sous-produits agro-industriels	masse	-		
Bagasse	masse	-	8,4	40
Déchets municipaux	masse	-	19,7	-

* Pour la liqueur noire comptabilisée comme combustible ligneux, on peut considérer que, à partir d'une tonne de pâte cellulosique chimique, on obtient un volume de liqueur noire équivalent à 2,27 m³ de combustible ligneux du point de vue énergétique. Source : FAO, 1997 [10].