

Biomasse forestière - Propriétés, mesures et facteurs de conversion



Objectif : apporter des connaissances générales aux propriétaires forestiers et aux étudiants pour optimiser l'utilisation de la biomasse dans la production

Sommaire

1. Introduction	1
2. Propriétés et mesures (2).....	1
3. Les différents types de biocombustibles forestiers (8) (9) (4) (10)	9
3.1 Bois de chauffage ou bûches (<i>firewood, wood logs</i>).....	9
3.2 Plaquette forestière.....	10
3.3 Granulés	12
3.4 Briquettes de bois.....	13
4. Facteurs de conversion.....	15
5. Annexe	16



1. Introduction

Les **propriétés des biocombustibles forestiers** sont les mesures ou la granulométrie, la composition chimique, le taux d'humidité et de cendres, la densité, la présence d'additifs, le pouvoir calorifique, la durabilité mécanique, le taux de fines, la matière volatile, etc. (1). L'origine et la source du biocombustible sont également des caractéristiques à prendre en compte. Les sections suivantes décrivent les propriétés les plus courantes.

2. Propriétés et mesures (2)

En général, pour quantifier les lots, le secteur forestier et l'industrie du bois utilisent le *mètre cube solide* pour le bois en rondins et la *stère* pour le bois empilé de jusqu'à 2 m de long. Le *mètre cube apparent* est employé pour les bouts de petite taille ou bien bois décheté (plaquettes, copeaux) en vrac.

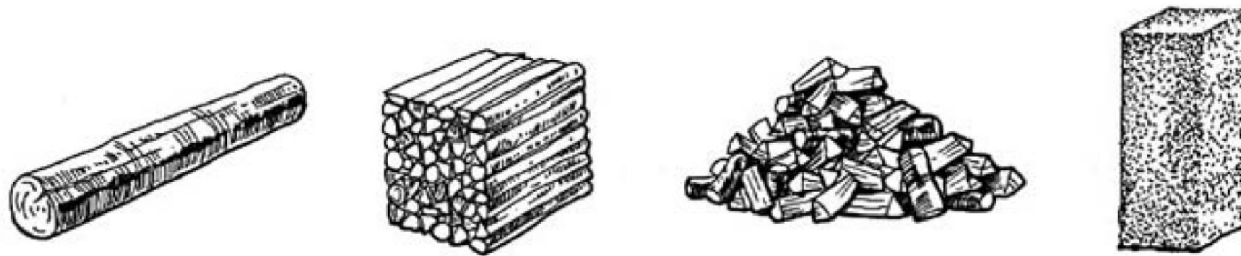


Stère de bois

Mètre cube solide (m³ ou mc) : mètre cube de bois massif (bois en rondins) sans espaces vides.

Stère (str), volume apparent : volume d'un mètre cube de bois coupé et empilé, avec les espaces vides.

Mètre cube apparent (MAP), volume apparent : volume de bois déchiqueté en vrac (plaquettes, sciure, chutes, etc.) ayant un total d'un mètre cube avec les espaces vides.



1 m³ de bois en rondins ≈ 1,4 m³ de troncs d'1 m empilés ≈ 2 m³ apparents de bois bûche ≈ 3 m³ apparents de copeaux moyennes (G50)

Figure 1 : Volume équivalent de bois massif, bois de chauffage et plaquettes (3)

Humidité : le rendement énergétique varie selon les bois. Le premier facteur déterminant du rendement est l'humidité (teneur en eau) puis la dimension et le type du bois.

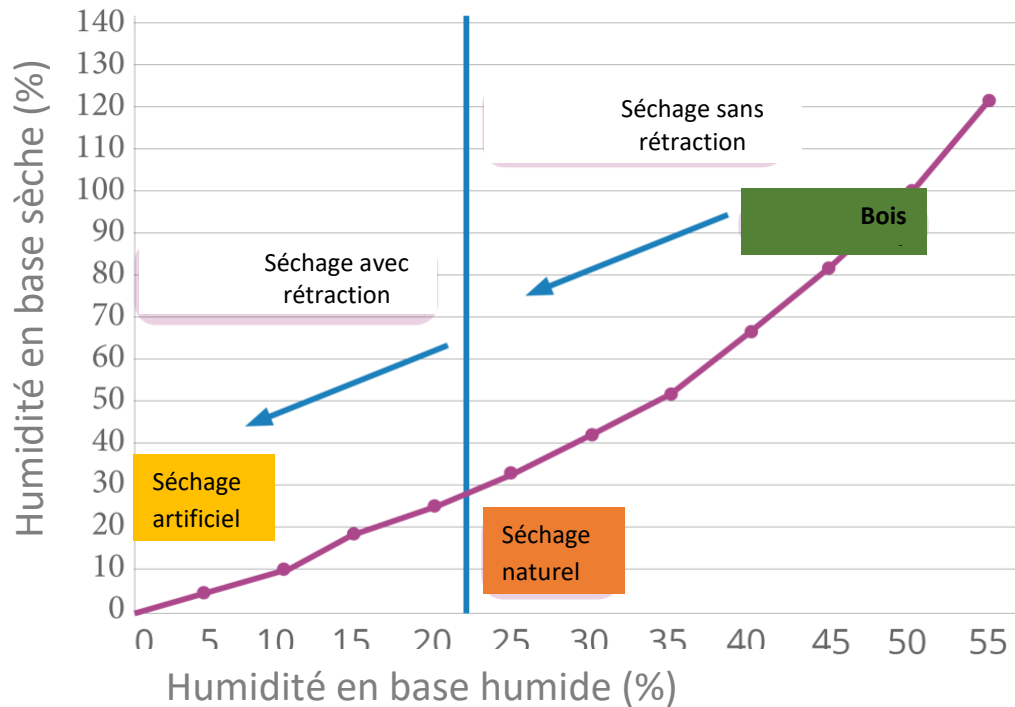
Humidité sur brut (M ou H_{base humide}, %) : masse d'eau contenue dans le bois par rapport à la masse totale du bois. Ce taux d'humidité du bois est celui utilisé dans le domaine de la bioénergie. Le bois venant d'être coupé a un taux d'humidité de près de 50 % alors qu'une fois séché à l'air libre, ce taux passe à 20-25 % :

- M ou H_{bh} (%) = Poids de l'eau * 100 / poids du bois humide.

La norme ISO 17225-1 (1) détermine des classes d'humidité (% selon le matériel reçu) dans des intervalles de 5 % de < 10 % à >55 %.

Humidité sur sec (U ou $H_{base\ sec}$, %) : masse d'eau contenue dans le bois par rapport à la masse du bois sec. Unité employée dans le domaine forestier. Le bois vert a un taux d'humidité sur sec de près de 100 % alors qu'une fois séché à l'air libre, il passe à 25-30 % :

- U ou H_{bs} (%) = Poids de l'eau * 100 / poids du bois sec.



Équivalence de l'humidité sur la masse brute et de l'humidité sur sec. Source : Bois Energie 66 (4)

L'humidité maximale recommandée est de 20-30 % H_{bh} pour optimiser le processus énergétique. Le cas échéant, il y a une perte de chaleur, les températures baissent, et il y a plus de fumées, outre les émissions et les éventuels dommages dans la cheminée.

Tonne anhydre (t_0 , atro t) : masse de bois complètement sèche. Cette unité de mesure de la masse théorique est calculée avec une humidité de 0 %.

Tonne de bois humide (t_x) : masse de bois avec un certain pourcentage d'humidité sur masse brute (M ou H_{bh}).

Densité : rapport entre le poids du biocombustible et le volume en m^3 solide, stère ou MAP.

Densité énergétique (MJ/m^3 ou kWh/m^3 seul) : pouvoir calorifique par volume qui peut être calculé au cours des différentes phases du biocombustible (transport ou stockage).

Format commercialisé : la taille et la forme ont une influence sur la manutention et la combustion du combustible. Bien que la liste ne soit pas exhaustive, plus de 20 formats sont disponibles sur le marché (1), parmi lesquels : plaquettes, combustible broyé, bûches, briquettes, sciure, copeaux, bottes, granulés ou arbre complet.

Origine et source (1) : provenance de la biomasse selon une classification hiérarchique qui comprend la biomasse ligneuse, herbacée, de fruits, aquatique, ensembles et mélanges. Il y a jusque 4 niveaux de spécification d'origine et de source de la biomasse. Par exemple : 1. Biomasse ligneuse ; 1.1 Biomasse ligneuse provenant de la forêt, de plantation et autre bois vierge ; 1.1.3 Fût ; 1.1.3.2 Conifères avec écorce.

Pouvoir calorifique: chaleur utile dégagée lors de la combustion complète d'une quantité déterminée de biocombustible. Le pouvoir calorifique dépend donc du taux d'humidité.

Pouvoir calorifique brut ou supérieur (PCS, MJ/kg ou kWh/kg): chaleur totale dégagée lors de la combustion complète d'une unité de masse de combustible sans tenir compte de la chaleur latente de la vapeur d'eau produite pendant la combustion, car il n'y a pas de changement de phase ; l'eau est expulsée à l'état gazeux. Il s'agit de la chaleur produite lors de la réaction de la combustion.

Pouvoir calorifique net ou inférieur (PCI ou Q, MJ/kg ou kWh/kg): chaleur totale dégagée lors de la combustion complète du combustible lorsqu'il y a condensation de la vapeur d'eau pendant la combustion. Le PCI tient donc compte ici de la chaleur dégagée pendant ce changement de phase. Il s'agit de la chaleur utilisable de la combustion. Cette mesure est la plus utilisée dans la pratique.

État du bois	Humidité sur masse brute (H_{bh})	Pouvoir calorifique inférieur (PCI)
Vert (juste coupé)	50-60 %	2,0 kWh/kg
Après un été	25-35 %	3,4 kWh/kg
Après plusieurs années	15-25 %	4,0 kWh/kg

Tableau 1 : Pouvoir calorifique du bois selon sa teneur en eau (2)



- Plus le bois est sec, plus le pouvoir calorifique est grand et donc plus le rendement énergétique est important. La biomasse sèche stockée peut arriver à avoir deux fois le PCI du bois qui vient d'être coupé (tableau 1).
- Toutes les espèces forestières ont un PCI similaire par kg de bois. Toutefois, si le PCI est calculé sur un volume, le type de bois est un facteur important.
- 2,5 kg de bois séché à l'air libre équivalent à 1 l de gasoil environ.

Granulométrie (distribution des fragments) et dimensions (1) (5) (6) (7) : la granulométrie s'applique aux plaquettes et indique la mesure des fragments qui constituent le combustible. Elle conditionne la densité apparente, de même que le comportement du matériau pendant le transport, le stockage, l'approvisionnement et la combustion. Les plus grandes pièces peuvent boucher le système d'alimentation des petites installations. Ainsi, pour une combustion optimale, une certaine taille de particule est préconisée ; si elle est trop petite, elle peut entraîner un comportement explosif et si elle est trop grande, elle peut entraîner une combustion incomplète.

Les normes ISO établissent différentes classes de granulométrie (P16-P300) selon la distribution granulométrique du biocombustible. Elle mesure la fraction principale (>60 %), la longueur maximale, la zone transversale de la fraction la plus épaisse et la fraction fine. Il est recommandé de réduire la teneur en éléments grossiers pour éviter toute obstruction et faciliter la gestion du matériau. La présence de fines doit également être restreinte dans la mesure du possible pour éviter l'engorgement des systèmes d'alimentation. La nomenclature comprend le P du terme anglais « Particle size ») et le diamètre maximal de la fraction principale (p. ex. 16, 31 ou 45 mm correspondent à P16, P31 ou P45). Pour les autres biocombustibles, les dimensions sont également stipulées.



Composition (% sur matière sèche) : la composition chimique du biocombustible (C, H, N, S, Cl, etc.) dépend de la matière première de fabrication : bois, feuilles, écorce, etc. Cette composition conditionne la combustion et ses caractéristiques : pouvoir calorifique plus ou moins important, éventuelles émissions d'oxydes d'azote ; corrosions et cendres, émissions ou cendres polluantes, etc.

Cendres (% sur matière sèche) : sous-produit de la combustion qui se dépose ou reste en suspension, les cendres ont une certaine importance car elles doivent être dûment retirées et gérées. Elles peuvent être mises au rebut en tant que déchet ou bien servir de matière première pour d'autres produits. En outre, la composition chimique des cendres peut contribuer à la détérioration et à la corrosion des installations de combustion. La teneur en cendres a donc des conséquences économiques.

La génération de cendres, qui dépend du matériau employé, augmente en présence de feuilles et d'écorce. La présence dans la biomasse de terre et de cailloux génère également plus de déchets de combustion, ce pourquoi la combustion de bois de souches et de racines produit plus de cendres. Ces inconvénients justifient l'effort à faire pour éviter la contamination du matériau pendant sa valorisation, d'une part en laissant l'arbre perdre ses feuilles sur place et d'autre part, en évitant le traînage.



À gauche : brûleur avec résidus et pierres À droite : brûleur à plaquettes sans résidus. I. López

Le taux de cendres que génère la combustion de plaquettes d'arbres entiers est d'environ 1 %, c'est-à-dire de 4 à 6 kg/m³ de combustible solide. Le bois propre produit moins de 1 % de cendres alors que l'écorce peut atteindre 2-3 %, et les aiguilles et les feuilles, jusque 6-8 %.

Certains centres de valorisation énergétique remettent dans la forêt les cendres produites pour compenser l'extraction de nutriments, surtout en cas de valorisation intensive de la masse forestière.

3. Les différents types de biocombustibles forestiers (8) (9) (4) (10)

La biomasse forestière peut être utilisée comme source d'énergie sous différents **formats commercialisés** (1) pour obtenir de l'électricité ou de la chaleur. La présente fiche aborde les quatre principaux formats : bûches de bois (*firewood and log wood*), plaquettes, granulés et briquettes.

3.1 Bois de chauffage ou bûches (*firewood, wood logs*)

Les bûches de bois sont le biocombustible le moins élaboré et le plus traditionnel, avec un marché bien établi. Elles sont obtenues de toutes les espèces ligneuses, bien que les plus appréciées soit de chêne vert, de chêne et de hêtre. Les bûches sont les troncs coupés et fendus formant des quartiers de dimensions similaires. Leur forme est cylindrique ou conique avec des diamètres très hétérogènes. Elles servent de combustible pour les poêles, les cheminées, les fours et les systèmes de chauffage central.

Caractéristiques des bûches

- Dimensions : troncs ou quartiers dont la longueur peut varier de 20 à 100 cm.
- Humidité : le bois venant d'être coupé présente un taux de 40-50 % H_{bh} (chêne-pin). Après un certain temps en plein air, l'humidité baisse jusqu'à 20 % H_{bh} environ. Pour brûler, ce taux devrait être idéalement inférieur à 15 % H_{bh}. Le bois ayant un taux élevé d'humidité ralentit et gêne la combustion. Il produit de la condensation et du goudron dans les conduits, et réduit son pouvoir calorifique.
- Densité apparente : 400-500 kg/stère.
- PCI : environ 3 900 kWh/t.
- Cendres : environ 1,2 % du poids sec total.



Les chaudières à bois sont aujourd'hui déjà très efficaces, mais demandent, à quelques exceptions près, une alimentation manuelle une ou deux

fois par jour.



Bois de chauffage coupé, fendu et entassé. AFIB-CTFC.



3.2 Plaquette forestière

La plaquette forestière se compose de fragments ou de morceaux subrectangulaires de petites dimensions variables, obtenus par découpe mécanique. Ce déchetage permet d'homogénéiser dans une certaine mesure ses propriétés (taille, humidité) et d'automatiser son alimentation dans les installations de chauffage ou de production d'électricité. Elle peut être d'origine forestière ou industrielle. La *plaquette de gestion forestière durable* (plaquette forestière) est obtenue en retirant de la forêt le bois de mauvaise qualité ou les restes de la valorisation. Cette extraction permet d'amortir les travaux d'amélioration forestière ou de prévention d'incendies. En revanche, la *plaquette industrielle* provient des sous-produits de l'industrie du bois.

Le prix de la plaquette forestière est inférieur à celui du granulé étant donné que son processus d'élaboration est moins complexe. D'autre part, la plaquette forestière favorise la gestion forestière puisqu'elle utilise le bois qui n'a pas de valeur sur le marché.

Il s'agit cependant d'un matériau plus hétérogène que les granulés en termes d'humidité, de densité et de granulométrie, sa manutention et son transport sont moins simples et demandent des espaces de stockage plus importants. Des contrôles de qualité, surtout dans les installations particulières, et une distance de transport inférieure à 50 km sont préconisés.

D'autre part, il est important de distinguer la plaquette du bois broyé ; alors que la plaquette a une forme définie par la découpe mécanique d'un outil affilé (déchiqueteuse), le bois broyé est désintégré par l'action de coups avec des outils de type marteaux, chaînes ou rouleaux. Le bois broyé est souvent utilisé dans l'industrie des pâtes, papier et carton.



Plaquette forestière. I. López.

Caractéristiques de la plaquette forestière

- Dimensions : forme subrectangulaire, côté de 0,5-5 cm (<10 cm), faible épaisseur (env. 0,5-1 cm).
- Humidité : taux variable de 20 % et 40 % H_{bh} . L'idéal est une humidité homogène de 30 % H_{bh} .
- Densité apparente : 280 kg/MAP (conifère G_{30}). Varie selon la granulométrie et l'humidité (>200 kg/MAP).
- PCI : en général 3 500 kWh/t₃₀. (1 123 kWh/m³, 3 011,5 kcal/kg)
- Cendres : <3 % du poids sec. <1% en l'absence d'écorce, de feuilles et de ramilles.

3.3 Granulés

Biocombustible densifié fabriqué à partir de particules de bois moulu soumises à un processus de séchage forcé puis d'extrusion. Le granulé est un petit cylindre de bois compact ayant un grand pouvoir calorifique (haute densité énergétique) grâce à l'absence d'humidité.

Le compactage du biocombustible présente l'avantage d'homogénéiser l'humidité, la densité et la granulométrie. Il en facilite ainsi la manutention, réduit les coûts de transport et optimise le rendement énergétique par unité de volume. Cela signifie également que son stockage demande moins d'espace. La teneur en cendres par rapport aux plaquettes et aux bûches simplifie l'utilisation et l'entretien des installations de chauffage. Enfin, sa commercialisation partout dans le monde suit les normes ISO.



Granulés de bois. AFIB-CTFC

En revanche, le processus de fabrication étant plus complexe, le produit est plus cher que d'autres biomasses. Il n'améliore pas directement la gestion forestière durable puisqu'il est généralement fait à partir de sous-produits industriels.

La fabrication des granulés implique l'utilisation d'une matière première très sèche ($<12\% H_{bh}$) et l'absence d'impuretés. La présence d'impuretés (sable, matériaux inertes, etc.) réduit le pouvoir calorifique et peut endommager la machinerie servant à fabriquer le granulé. C'est pour cela que les granulés sont généralement fabriqués à partir de sous-produits industriels du sciage du bois (chutes, morceaux, sciure, copeaux) dûment pulvérisés et séchés jusqu'à $8-10\% H_{bh}$. En d'autres termes, il ne s'agit généralement pas de biomasse forestière provenant directement de la valorisation forestière. Ces produits ne seront donc pas contemplés dans la description du processus de production et de fourniture.

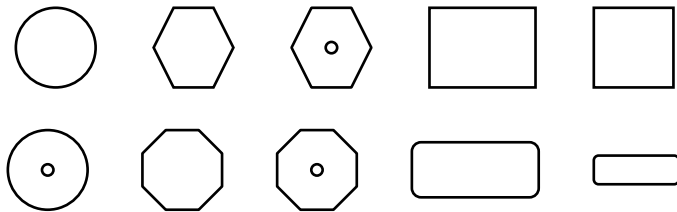
Caractéristiques des granulés

- Dimensions : cylindres de différentes longueurs
- Diamètre (D) : 4-10 mm (<30 mm)
- Longueur variable 10-70 mm (<5xD)
- Humidité : en général <10 % H_{bh} (<15 % H_{bh})
- Densité apparente : 650 kg/MAP
- PCI: >5 kWh/kg (>3.055 kWh/m³; >4.321 kcal/kg)

3.4 Briquettes de bois

Biocombustible solide de forme cylindrique ou cubique selon le processus de fabrication, d'un diamètre ≥ 25 mm. Il est obtenu avec une presse à vérin qui comprime la biomasse ligneuse pulvérisée ou découpée. La matière première est principalement issue de plaquettes, de sciure ou de copeaux, mais elle contient souvent aussi du bois recyclé, de la balle de riz, de la canne à sucre, du papier, etc. La briquette la plus courante est faite de plaquettes compactées sans agglomérant étant donné que la lignine qui a un taux adéquat d'humidité est un agglutinant naturel.

Figure 2 : Sections de briquettes existantes sur le marché



Il y a sur le marché des chaudières automatiques pour briquettes, mais leur utilisation n'est pas étendue. Les briquettes fonctionnent dans les poêles et les chaudières à bois, mais dans ce cas, elles doivent être mises manuellement. En outre, des systèmes sont souvent utilisés dans les résidences secondaires, avec un usage similaire au bois de chauffage.

Les avantages des briquettes sont leur grand pouvoir calorifique, l'homogénéité de l'humidité, de la densité et de la granulométrie, ce qui facilite la manutention et le transport par rapport aux bûches. Tous comme les granulés, elles sont commercialisées partout dans le monde selon les normes EN ou ISO. Selon leur composition, elles peuvent atteindre des taux très bas de cendres, réduisant ainsi les opérations de maintenance.

En revanche, le processus de compactage élève le prix de ce combustible par rapport à d'autres biomasses et, sa matière première étant principalement des sous-produits industriels, sa fabrication n'intervient pas directement dans la gestion forestière. Par conséquent, tout comme les granulés, les briquettes ne seront pas contemplées dans la description du processus de production et de fourniture.



Briquettes de différentes sections. AFIB-CTFC.

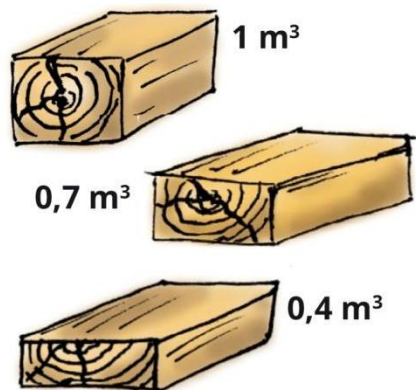
Caractéristiques

- Dimensions : Longueur variable et diamètre ≥ 25 mm
- Humidité : Généralement < 10 %. Toujours < 15 %)
- Densité : $1000-1300$ kg/m³
- PCI : 5.200 kWh/t₁₀ variable selon la matière première.
- Cendres : < 3 % du poids sec. Qualité optimale $< 0,5$ %

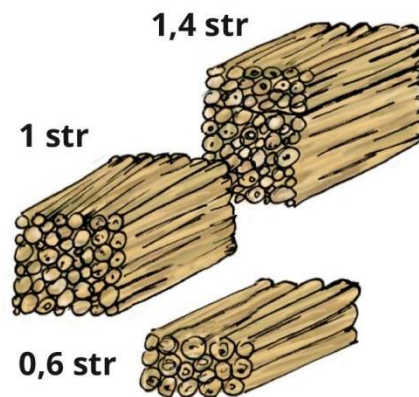
4. Facteurs de conversion

Facteurs de conversion indicatifs pour unités de volume (2)

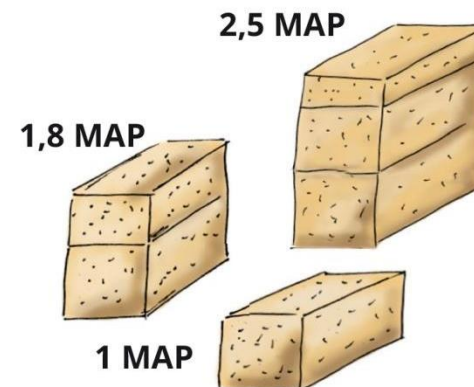
Bois en rondin (m³)



Bois empilé (st)



Plaquette en mètres cubes apparents (MAP)



1 mètre cube de solide (m³) ≈ 1,4 stères de bois empilé (st) ≈ 2,5 mètres cubes apparents de plaquette (MAP)

Les conversions indiquées sont des valeurs de référence et peuvent varier selon leurs caractéristiques intrinsèques, la granulométrie et le compactage pendant le transport.

Tableau 2 : Coefficients de conversion énergétique (valeurs arrondies) (11) (Agence internationale de l'énergie)

	GJ	MWh	Tep
GJ	1	0,287	0,24
MWh	3,60	1	0,086
Tep	41,88	11,63	1

GJ : GigaJoule (10⁹ J)

MWh : Mégawattheure (10⁶ Wh)

tep : tonne d'équivalent pétrole

Tableau 3 : Pouvoir calorifique inférieur du bois (PCI) (11)

	GJ	MWh	Tep
1 t de bois anhydre	18,20	5,06	0,43
1 t de bois 30 % Hbh	12,90	3,36	0,29
1 t de bois 45 % Hbh	8,84	2,45	0,21
1 t de bois 50 % Hbh	7,88	2,20	0,19

5. Conclusion

Une précise définition des biocombustibles est essentielle pour son achat/vente de ces carburants ; en fonction de leurs caractéristiques et propriétés, plutôt la granulométrie et le taux d'humidité se conformera le pouvoir calorifique entre d'autres variables du même matériel, on trouvera distinctes prix par unité de combustible, selon sa qualité.

Fournir la bonne qualité à chaque type d'installation de biomasse qui, en fonction de sa puissance, de son alimentation, de son brûleur, etc., exige différentes propriétés de biocombustible (le fabricant de chaudières doit apporter ce type d'information), c'est d'une importance capitale pour la réalisation d'une correcte combustion (combustion complète), augmentant le rendement des installations de chaudières de biomasse domestiques en zones urbaines.

Les cendres résultantes de la combustion sont un bon indicateur de sa propre combustion et par conséquent de la qualité de combustible utilisé. Dans celles-ci, il est possible détecter, si au cours de la chaîne de traçabilité du produit ont été ajoutés impropres qui réduisent la qualité, c'est aussi important l'étude de l'origine et chaîne de production de ces biocombustibles, pour la détection des points faibles et son renforcement dans le but de créer un produit de bonne qualité.

6. Annexe

A - Bibliographie

- 1 AENOR. **UNE-EN ISO 17225-1**: 2014 Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1: Requisitos generales. Madrid: [s.n.], 2014.
- 2 LK STMK (AT) Y CTFC. **Biocombustibles de qualitat a l'abast de tothom. Informació pràctica sobre sistemes de calefacció amb biomassa forestal**. [S.l.]: CTFC, 2014.
- 3 FRANCESCATO, V.; ANTONINI, E.; ZUCCOLI, L. **Manual de combustibles de madera. La production. Requisitos de calidad. Comercialización**. Valladolid: AVEBIOM, 2008.
- 4 FAMADAS, F.; CERVERA, T. **Biomassa forestal per a la producció d'energia tèrmica**. [S.l.]: Generalitat de Catalunya. DARPAMN. CPF., 2011.
- 5 AENOR. **UNE-EN ISO 17827-1**: 2016. Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución de tamaño de partícula para combustibles sin comprimir. Parte 1: Método del tamiz oscilante con abertura de malla igual o superior a 3,15 mm. Madrid: [s.n.], 2016.
- 6 AENOR. **EN-ISO 17827-2**: 2016. Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución de tamaño de partícula para combustibles sin comprimir. Parte 2: Método del tamiz vibratorio con abertura de malla inferior o igual a 3,15 mm. Madrid: [s.n.], 2016.
- 7 AENOR. **EN-ISO 17829**: 2015. Biocombustibles sólidos. Determinación de la longitud y el diámetro de pélets. Madrid: [s.n.], 2015.

8 AFIB, CTFC. **Síntesi d'informació temàtica: Biomassa.** [S.l.]: CTFC., 2012.

9 KRAJNC, N. **Wook fuels handbook.** Pristina: Ed. FAO, 2015.

10 AENOR. **UNE-EN ISO 16559: 2015 Biocombustibles sólidos.** Terminología, definiciones y descripciones. Madrid: [s.n.], 2015.

11 FCBA. **Mémento FCBA.** [S.l.]: [s.n.], 2017.

12 RODRÍGUEZ, J. et al. **Aprofitament i desembosc de biomassa forestal.** [S.l.]: Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Centre de la Propietat (CPF)., 2006.

13 NAVARRO, P. J. **Manifest per la defensa de l'ús de la biomassa forestal com a recurs energètic al Vallès Occidental.** [S.l.]: Inédito, 2017.

14 BOKU; CEPF; CTFC; ALUFR; WOOD K PLUS; CNPPF-IDF. **Prospects for the market supply of wood and other forest products from areas with fragmented forest-ownership structures.** Vienna (AT): Study for the European Commission. Retrieved on November 2017 from https://ec.europa.eu/agriculture/external-studies/supply-wood_en, 2010. University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna (BOKU); Confederation of European Forest Owners (CEPF); Centre Tecnològic Forestal De Catalunya (CTFC); Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (ALUFR); Kompetenzzentrum Holz GmbH (Wood K plus).

15 SOLANES, X. (.; LUDEVID, A.; BLANCH, J. S. **La biomassa forestal, una aposta de futur per a Catalunya.** [S.l.]: Direcció General del Medi Natural. Servei de Gestió Forestal. 37 pp., 2010.

Conception et rédaction : Judit Rodríguez, Gerard Alcoberro

Crédits illustrations : AFiB-CTFC

Édition : Juin 2019

Maquette : Eduter-CNPR

Plus d'informations ?

Voici les partenaires d'eForOwn qui peuvent vous informer, vous former et vous accompagner

Vous êtes propriétaire forestier

En Belgique



En Espagne



En France



Vous êtes étudiant ou enseignant

En Belgique



En Espagne



En France

