



ADEME

Mise en place d'une chaufferie biomasse

Étude et installation d'une unité à alimentation automatique

Juliette Talpin, Stéphane Cousin,
Serge Defaye, Rémi Grovel,
Jean-Pierre Tachet, Sylvain Bordebeure



Mise en place d'une chaufferie biomasse

Étude et installation d'une unité à alimentation automatique

edp sciences



Imprimé en France
ISBN : 978-2-7598-1199-1

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2014



Sommaire

Chapitre 1	Introduction	1
1.1	Contexte et enjeux.....	1
1.2	Les acteurs de la filière biomasse énergie	6
1.3	Le rôle de l'ADEME.....	9
1.4	Les unités utilisées	9
Chapitre 2	Production, transformation et livraison des combustibles bois	13
2.1	Matières premières ligneuses : inventaire et classement réglementaire pour la combustion.....	14
2.1.1	<i>Bois d'origine forestière, bocagère ou urbaine.....</i>	15
2.1.2	<i>Sous-produits ou produits connexes de l'industrie du bois</i>	22
2.1.3	<i>Les sous-produits agricoles et agroalimentaires</i>	29
2.1.4	<i>Plantations dédiées et agroforesterie</i>	31
2.1.5	<i>Classement réglementaire des bois comme combustibles ou déchets</i>	36

2.2 Production et caractéristiques des combustibles bois	37
2.2.1 <i>Transformation des matières premières en combustibles bois</i>	38
2.2.2 <i>Caractéristiques et classification des bois déchiquetés.....</i>	62
2.2.3 <i>Caractéristiques et classification des granulés de bois.....</i>	81
2.3 Livraison des biocombustibles.....	84
2.3.1 <i>Choix du mode de transport</i>	84
2.3.2 <i>Chargement du matériel de transport</i>	85
2.3.3 <i>Livraison au silo de stockage de la chaufferie.....</i>	86
Chapitre 3 Production et fourniture d'énergie.....	87
3.1 Technologies des chaufferies bois	88
3.1.1 <i>Chaufferies au bois déchiqueté.....</i>	88
3.1.2 <i>Chaufferies aux granulés de bois</i>	105
3.1.3 <i>Chaufferies brûlant d'autres biomasses.....</i>	111
3.1.4 <i>Générateur de chaleur.....</i>	112
3.1.5 <i>Traitements des fumées</i>	131
3.1.6 <i>Décendrage</i>	140
3.1.7 <i>Armoire de commande et de régulation.....</i>	147
3.2 Conception et dimensionnement des projets de chaufferies bois et de réseaux de chaleur	149
3.2.1 <i>Paramètres clé d'une chaufferie</i>	149
3.2.2 <i>Dimensionnement des projets de chaufferies bois</i>	159
3.2.3 <i>Dimensionnement d'un réseau de chaleur.....</i>	163
3.3 Exploitation d'une chaufferie bois.....	169
3.4 Aspects réglementaires	171
Chapitre 4 Montage des projets.....	175
4.1 Typologie des projets	175
4.1.1 <i>Les chaufferies dédiées à un seul établissement ou usager</i>	175
4.1.2 <i>Les chaufferies desservant plusieurs établissements ou groupes de logements</i>	178
4.1.3 <i>Pertinence du granulé de bois dans différentes situations</i>	183
4.1.4 <i>Exemples d'installations.....</i>	186
4.2 Les étapes d'un projet	194
4.2.1 <i>Évaluation de la pertinence d'un projet</i>	195
4.2.2 <i>Réalisation d'une étude de faisabilité.....</i>	196
4.2.3 <i>Décision du maître d'ouvrage</i>	196

4.2.4 Préparation, lancement et dépouillement des appels d'offres (loi MOP, loi Sapin DSP)	197
4.2.5 Construction et mise en route de la chaufferie bois.....	197
4.2.6 Suivi du fonctionnement	197
4.3 Structuration de l'approvisionnement en combustibles bois.....	198
4.3.1 Contrat de fourniture de combustible bois	198
4.3.2 Prix de vente des combustibles.....	200
4.3.3 TVA liée aux combustibles bois.....	204
4.4 Montage juridique.....	205
4.4.1 Nature de la maîtrise d'ouvrage	205
4.4.2 Montages juridiques.....	206
4.4.3 Synthèse	212
4.4.4 Mutualisation de la maîtrise d'ouvrage.....	215
4.5 Analyse économique	218
4.5.1 Paramètres économiques clés	218
4.5.2 Analyse de la viabilité économique d'un projet.....	227
4.6 Montage financier	231
4.6.1 Quels sont les besoins de financement ?	231
4.6.2 Qui porte le financement ? (cf. § 4.4.3).....	231
4.6.3 Comment couvrir les besoins en financement ?	231
4.6.4 Critères de « bancabilité » d'un projet bois-énergie	232
4.7 Impacts d'une chaufferie bois sur son environnement	233
4.7.1 Impacts sur l'emploi	233
4.7.2 Impacts sur les émissions de CO₂	235
4.7.3 Impacts sur la pollution atmosphérique	238
4.7.4 Impacts sur l'écosystème forestier	240
Synthèse : 5 recommandations pour réussir un projet.....	243
Références bibliographiques	247
Glossaire.....	257
Sigles	261
Liste des figures	265
Liste des tableaux.....	271

Vj ku'r ci g'lpvgpvkqpcm{ 'ighv'dn^cpm



Introduction

1.1 Contexte et enjeux

Le plan national d'actions en faveur des énergies renouvelables 2009-2020 [1] s'inscrit dans le cadre d'une stratégie globale de transition énergétique comprenant aussi un plan national d'actions en matière d'efficacité énergétique. Il comprend des mesures visant notamment à réaliser 12 millions de tep d'économies d'énergie à l'horizon 2016.

Le développement du bois-énergie doit aussi respecter les exigences du plan national santé environnement 2009-2013 [2] et notamment le plan particules. En effet, s'il est utilisé à grande échelle et dans de mauvaises conditions, le chauffage au bois peut générer des pics d'émissions de poussières fines et de composés susceptibles de nuire à la santé. Pour les éviter, le plan particules préconise de remplacer le parc d'appareils domestiques anciens par des équipements garantissant une haute performance énergétique et environnementale, de généraliser des filières d'approvisionnement en bois de qualité, enfin d'entretenir les équipements et ramoner régulièrement les conduits de fumées [3].

Il vise à réduire les émissions de particules des appareils de chauffage domestique, des chaudières industrielles et agricoles.

La filière biomasse énergie s'est fortement développée dans le cadre des programmes bois-énergie pilotés par l'ADEME depuis 1995 avec une accélération depuis 2009 suite à la

mise en place du Fonds chaleur. La mise en œuvre de ces installations permet de répondre à l'objectif 2012 du plan d'action national en faveur des EnR 2009-2020 et doit encore s'amplifier pour répondre à l'objectif 2020 (Fig. 1.1).

Près de 5 000 installations biomasse énergie sont en fonctionnement ou en cours de réalisation dans les secteurs collectifs, tertiaire et industriels pour une consommation annuelle supérieure à 1,6 Mtep.

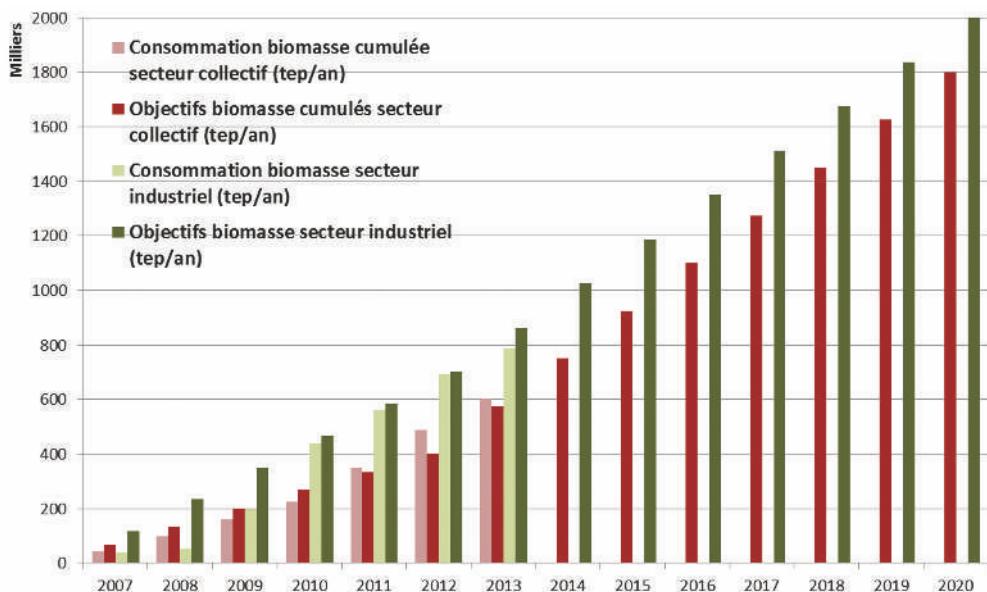


Figure 1.1 Consommation prévisionnelle cumulée des chaufferies collectives et industrielles (engagées par l'ADEME) au regard des objectifs à l'horizon 2020.

Le Fonds chaleur (chiffres de référence : aides de 2009 à 2012) a eu un fort effet de levier avec des investissements trois fois plus élevés que les aides apportées (Tab.1.1). Il engendre une activité économique importante avec un chiffre d'affaires annuel de 500 M€ dont la moitié dans la filière d'approvisionnement (filière bois française). Le Fonds chaleur permet la création de 5 000 emplois supplémentaires liés à l'exploitation et l'approvisionnement des installations ainsi que 1 500 emplois pendant cinq ans pour la construction et l'installation des équipements de combustion. Ces emplois sont à 90 % situés en France. Les équipements d'ores et déjà aidés par le Fonds chaleur éviteront l'importation de plus d'un million de tep/an de combustibles fossiles, soit un coût minimal (référence : prix de gros du gaz) de 300 M€ par an. Il participe ainsi à l'équilibre de la balance commerciale et à l'indépendance énergétique de la France. En pérennisant le dispositif au niveau actuel, le nombre d'emplois créé en 2020 serait d'environ 15 000 pour un coût d'importation de gaz évité supérieur à 750 M€ par an.

Tableau 1.1 | Bilan 2009-2012 et perspectives 2020 du Fonds chaleur renouvelable (© ADEME).

	Fonds chaleur 2009-2012 ¹ biomasse	Évolution de l'impact si maintien du Fonds chaleur (niveau actuel) jusqu'en 2020
Aides apportées	600 M€	1 800 M€
Investissements engendrés	1 800 M€	5 400 M€
Chiffre d'affaires annuel de vente de chaleur	480 M€/an	1 600 M€/an
Chiffre d'affaires annuel lié à l'approvisionnement (achat de combustibles biomasse)	240 M€/an	800 M€/an
Quantité annuelle d'énergie fossile substituée	1 020 ktep/an	3 400 ktep/an
Économie annuelle sur l'importation de gaz ²	300 M€	1 000 M€/an
Quantité de CO ₂ d'origine fossile évitée par an	2,6 millions de tonnes	8,6 millions de tonnes

1 : bilan intégrant un prévisionnel pour 2012.

2 : source CRE marché de gros du gaz (25 €/MWh)/le prix moyen du gaz à l'usager est plus élevé, notamment dans le cadre du tarif régulé. Par simplicité, nous avons considéré une substitution à 100 % du gaz alors que la biomasse vient aussi en substitution du charbon (2 %) et du fioul (12 %), énergies plus chères et plus fortement émettrices de GES.

Bien que la filière biomasse énergie présente de nombreux atouts pour répondre aux enjeux énergétiques, économiques et environnementaux, elle présente encore des marges de progression possible sur les points suivants :

- l'amélioration de la performance énergétique par l'optimisation des rendements de production et de distribution, notamment à charge partielle ;
- l'amélioration des performances environnementales par la réduction des émissions de poussières et particulièrement de NOX ;
- une mobilisation accrue des ressources forestières pour répondre à l'augmentation de la demande en optimisant les systèmes de traçabilité, de tri et de préparation des combustibles biomasse.

Le présent ouvrage aidera les porteurs de projets de chaufferies biomasse à connaître les différents types de ressources, leurs disponibilités et la logistique nécessaire à leur mise à disposition (*cf. § 2*). Ensuite, il leur permettra d'en savoir davantage sur les différentes technologies de chaufferies biomasse ainsi que leurs équipements (traitements de fumée, décendrage...) et leur dimensionnement. Enfin, le guide leur apportera des éléments sur le montage du projet – qu'il s'agisse d'une chaufferie dédiée ou sur réseau de chaleur – tant du point de vue juridique qu'économique ou réglementaire.

Quelques questions/réponses

Les ressources en biomasse seront-elles suffisantes pour alimenter tous les projets de chaufferies ?

Actuellement, l'accroissement annuel des forêts françaises est supérieur aux prélèvements effectués pour le bois d'œuvre, le bois d'industrie (industries du papier et du panneau de particules) et le bois-énergie (bois bûche, plaquettes forestières...). Une vaste étude publiée en 2010 montre qu'il existe un potentiel important d'augmentation des volumes prélevés pour l'énergie sans hypothéquer la ressource, même s'il existe des disparités selon les régions. Cependant, les études macroéconomiques sont insuffisantes pour évaluer la ressource potentielle de chaque projet. Un plan d'approvisionnement détaillé doit obligatoirement être réalisé par le porteur de projet. Pour les plus grandes installations, ce plan est soumis à la préfecture des régions concernées par le projet, qui analyse sa compatibilité avec les prélèvements existants et à venir dans le cadre des autres projets en cours.

Une chaufferie biomasse permet-elle une meilleure maîtrise du poste « énergie » ?

Pour évaluer la rentabilité d'un projet biomasse, on compare le coût global de la solution biomasse avec le coût global de la solution de référence utilisant une énergie fossile (Fig. 1.2). Les éléments constitutifs du prix de la chaleur utile dans la solution biomasse et dans la solution comparative utilisant une énergie fossile sont :

- P1 : fourniture du ou des combustibles ;
- P'1 : électricité et cendres ;
- P2 : maintenance courante ;
- P3 : gros entretien et renouvellement ;
- P4 : amortissement de l'investissement.

Le prix du bois déchiqueté est deux à trois fois moins élevé que celui du fioul domestique ou du gaz naturel. La part du combustible dans le coût global d'une chaufferie bois se limite à 30-40 % alors qu'elle dépasse les 80 % dans le cas de l'énergie fossile.

Les aides publiques apportées permettent de réduire le coût global de la solution bois ce qui implique une économie par rapport à la solution fossile. La solution biomasse est aussi moins dépendante de la volatilité du cours des énergies.

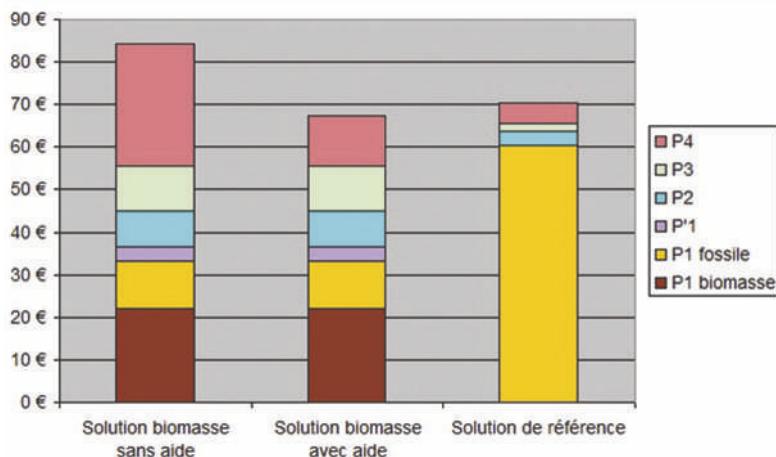


Figure 1.2 Comparaison du coût global d'une chaufferie biomasse par rapport à la solution de référence.

Monter un projet de chaufferie bois est-il plus difficile que celui d'une chaufferie gaz ou fioul ?

La filière bois-énergie a atteint un stade de maturité qui permet aujourd’hui de concevoir, réaliser et exploiter un ouvrage et des équipements qui donnent entièrement satisfaction. Cependant, un projet de chaufferie bois-énergie est plus complexe à monter car il s’agit d’un combustible solide qui empêche le concepteur de fractionner les générateurs de chaleur en autant de modules que de bâtiments à chauffer. Ainsi, il faut souvent créer une chaufferie centrale et un réseau enterré de distribution d’énergie calorifique et même parfois, un réseau de chaleur (au sens juridique) qui supposera la mise en place d’une régie communale ou le recours à un délégataire, gestionnaire du service public local. Le maître d’ouvrage devra faire appel à des prescripteurs spécialisés pour mener à bien son projet, en ne négligeant surtout pas les aspects économiques, juridiques et financiers.

Quel est l’impact de l’utilisation de bois-énergie dans les chaufferies collectives et industrielles sur le développement des emplois ?

Le Fonds chaleur permet la création de 5 000 emplois supplémentaires liés à l’exploitation et l’approvisionnement des installations ainsi que 1 500 emplois pendant cinq ans pour la construction et l’installation des équipements de combustion (Tab. 1.2). Ces emplois sont à 90 % situés en France. Ceux liés à la création et la maintenance des réseaux de chaleur associés n’ont pas été pris en compte. En première approche, on peut estimer qu’ils sont équivalents aux emplois liés aux chaufferies gaz décentralisées supprimées par la mise en place des installations biomasse centralisées. En pérennisant le dispositif au niveau actuel, le nombre d’emplois créé en 2020 serait d’environ 15 000.

Tableau 1.2 Répartition des emplois dans la filière/impact Fonds chaleur 2009-2012 (© ADEME).

Activité	Emplois créés (etp*/an)	% Emploi direct	Description
Approvisionnement	4 002	57	Abattage, débardage, broyage, transport Emplois indirects : équipements machines forestières et maintenance associée, service aux entreprises, camions, carburant
Exploitation	1 023	100	
Total	5 025	66	
Emplois	% Emploi direct	Description	
Construction- installation	1 680/an en moyenne sur une durée de cinq ans	52	Fabrication chaudière, maîtrise d'œuvre, montage Emplois indirects : maîtrise d'œuvre (BET, architecte), travaux (électricien, maçon, ...)

* équivalent temps plein : 1645 h/an (35h* 47 semaines).

Le chauffage au bois-énergie est-il favorable à l'environnement ?

Les écosystèmes forestiers prélevent le CO₂ de l'atmosphère. L'utilisation des produits bois prolonge le stockage du carbone et permet d'éviter des émissions de gaz à effet de serre en se substituant à des matériaux coûteux en énergie ou directement aux énergies fossiles dans le cas du bois-énergie. Le cycle du carbone organique est court (quelques dizaines d'années), contrairement aux cycles du carbone inorganique et du carbone fossile qui se déroulent sur plusieurs millions d'années. Sur le long terme, une stratégie de gestion durable des forêts visant à maintenir ou à augmenter le stock de carbone en forêt tout en approvisionnant la filière bois (grume, fibre, énergie) à un niveau de prélèvement durable, générera les bénéfices d'atténuation maximum (selon le GIEC). Si le bois-énergie présente des atouts indéniables en termes d'émissions de gaz à effet de serre, il peut en revanche conduire à des émissions de polluants de l'air qu'il convient de prendre en compte. Le développement du bois-énergie doit être conjoint avec l'amélioration de la qualité de l'air : c'est pourquoi l'ADEME conditionne ses aides depuis plusieurs années à la mise en place de systèmes de traitement des fumées performants (électrofiltres, filtres à manches, ...). Pour plus d'informations, l'ADEME a publié un avis sur le bois-énergie et la qualité de l'air disponible sur le site Internet suivant www.ademe.fr.

1.2 Les acteurs de la filière biomasse énergie

L'association Biomasse Normandie tient à jour une base de données en ligne, qui répertorie les acteurs impliqués dans le chauffage au bois à alimentation automatique pour des applications collectives (habitat/tertiaire) et industrielles (y compris les petites puissances) :

bureaux d'études spécialisés ; fournisseurs de matériels ; exploitants de chauffage ; sociétés d'approvisionnement en combustibles bois ; associations de développement des énergies renouvelables...

Concernant les fournisseurs de combustibles, seules sont répertoriées les structures commercialisant plus de 1 000 t/an.

La liste est disponible sur le site Internet www.biomasse-normandie.org (rubrique Bois-énergie).

Le montage d'un projet biomasse énergie (*cf. § 4*) passe par une bonne organisation des différents acteurs depuis l'émergence de l'idée jusqu'à l'exploitation de l'installation [138] [137] [135] :

- le maître d'ouvrage (MO) : personne morale pour laquelle l'ouvrage est construit, celui qui investit ou délègue l'investissement (propriétaire, directeur des investissements). Exemple : le bailleur pour des logements sociaux, une commune pour une école primaire, la région pour un lycée etc. ;
- l'assistant à maîtrise d'ouvrage (AMO) : personne morale mandatée par le MO pour une mission d'assistance générale à caractère administratif, juridique, financier et technique. Exemple : le maire d'une commune ne peut rédiger le cahier des charges de consultation pour la maîtrise d'œuvre et mandate un AMO pour ce faire. L'AMO ne peut pas être missionné pour la maîtrise d'œuvre, le travail de l'AMO s'arrête au choix du maître d'œuvre ;
- la maîtrise d'œuvre (MOE) : personne morale mandatée par le MO, chargée de préparer puis de contrôler l'exécution des travaux. Elle rédige l'avant projet sommaire (APS), l'avant projet détaillé (APD), le dossier de consultation des entreprises. Lorsque les entreprises ont été choisies (procédure code des marchés publics), elle s'assure du respect des délais, de la bonne réalisation des travaux ;
- les fournisseurs et installateurs d'équipements : de nombreux équipements mécaniques, électriques et hydrauliques accompagnent le générateur de chaleur (*cf. § 3*). Les constructeurs de générateurs proposent souvent des solutions globales incluant l'ensemble des équipements nécessaires au bon fonctionnement de l'installation (chaîne d'aménage, chaudière, traitement des fumées, évacuation des cendres, etc.) ;
- les exploitants de chauffage : fédérés notamment au sein de la FEDENE (Fédération des services énergie environnement), les exploitants de chauffage proposent des solutions pour assurer le financement et/ou l'exploitation des installations biomasse énergie surtout pour des puissances supérieures à 1 MW ;
- les bureaux d'études : de plus en plus de structures présentent une compétence bois-énergie et accompagnent les maîtres d'ouvrages aux différents stades du projet (étude de faisabilité, assistance à maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, bureau de contrôle). Pour s'assurer des compétences des structures, le dispositif « reconnu Grant de l'environnement » a été étendu aux prestations d'ingénierie ;
- les fournisseurs de combustibles biomasse : suite à la mise en place de nombreuses chaufferies biomasse (5 000 en fonctionnement aujourd'hui), les fournisseurs se sont organisés pour répondre à cette demande et apporter un maximum de garanties. Le regroupement de fournisseurs à l'échelle régionale a souvent permis de sécuriser les approvisionnements

- en diversifiant les ressources mobilisables (sous-produits forestiers, sous-produits industriels et agricoles) ;
- les animateurs biomasse énergie (voir le Cahier du bois-énergie n° 53) : généralement salarié d'une structure associative, l'animateur est un élément clé pour la mise en œuvre des politiques publiques biomasse énergie. Il a notamment pour mission :
 - promouvoir la biomasse énergie, ressource renouvelable locale, dont l'utilisation est bénéfique pour l'environnement et créatrice d'emplois,
 - inciter les maîtres d'ouvrages collectifs ou industriels à réfléchir à une solution biomasse énergie le plus en amont possible de leurs projets de chauffage de bâtiments ou de process,
 - mobiliser les détenteurs de matières premières ligneuses afin qu'ils soient en mesure de proposer des combustibles biomasse adaptés aux besoins,
 - assurer le suivi des installations en fonctionnement sur plusieurs années, enrichissant ainsi un retour d'expérience précieux pour de nouveaux projets.

Ainsi, l'animateur est souvent la personne qui a une vision transversale de la filière biomasse énergie sur son territoire d'intervention (région, département) assurant le lien entre les différents intervenants avec pour unique objectif le développement harmonieux de projets. En effet, sans rôle commercial, il met de l'huile dans les rouages.

La note d'opportunité

La note d'opportunité permet d'expliquer le contexte, d'évaluer grâce à des ratios les principales caractéristiques techniques et économiques, d'examiner les possibilités d'approvisionnement en combustibles et d'évaluer l'intérêt global du projet. Cette première approche réalisée par les animateurs biomasse énergie permet de donner les clés de compréhension d'un projet biomasse énergie avant de lancer des études plus approfondies : cette pré-étude donne souvent des recommandations pour optimiser le projet (raccordement d'autres usagers, démarche préalable d'économie d'énergie, etc.).

Depuis 2006, les acteurs du bois-énergie sont réunis au sein du Comité interprofessionnel du bois-énergie (www.cibe.fr) qui a quatre missions principales :

- coordonner la réflexion des acteurs et créer des outils opérationnels pour concrétiser des opérations bois-énergie ;
- constituer un référentiel des technologies, des savoir-faire, des meilleures pratiques et des opérations exemplaires ;
- former des agents de développement et vulgariser le chauffage collectif et industriel au bois ;
- informer les pouvoirs publics sur les perspectives ouvertes par le bois-énergie et les interroger sur les freins économiques, réglementaires, fiscaux... qui contrarient son développement.

1.3 Le rôle de l'ADEME

L'ADEME a pour mission d'animer, de gérer et de coordonner le Fonds chaleur pour le développement des énergies renouvelables. Pour la filière biomasse énergie (secteurs collectif et industriels), sa mission s'articule autour de quatre axes principaux :

- le développement de la connaissance : l'ADEME identifie les freins au développement des installations biomasse et conduit les études nécessaires pour donner des réponses claires et trouver des solutions sur des thématiques variés :
 - émissions polluantes, analyse du cycle de vie, impact sanitaire,
 - évaluation de la ressource en biomasse et capacités de mobilisation,
 - veille technologique,
 - évaluation économique : coûts d'investissement et d'exploitation).

L'ADEME met également en œuvre des programmes d'échange et de recherche sur la biomasse énergie au niveau national, européen et international. La conduite de ces travaux a pour but de partager les connaissances des différents pays et de mutualiser les moyens pour assurer le développement de la biomasse énergie ;

- l'animation et la coordination d'un réseau : l'ADEME met en réseau les acteurs et anime des groupes de travail. Elle assure la diffusion de l'information à travers des campagnes de communication, de manifestations ou des relais (animateurs biomasse énergie) ;
- le conseil aux porteurs de projets : l'ADEME oriente les porteurs de projets dans leurs choix grâce à ses connaissances techniques, à l'animation de son réseau d'acteurs professionnels et à ses outils (cahiers des charges, guides, fiches référence) ;
- l'aide à la réalisation des installations : l'ADEME en partenariat avec les conseils régionaux et généraux, attribue des aides pour faciliter la réalisation des projets :
 - aide à la décision (*cf.* www.diagademe.fr),
 - aide à l'investissement (*cf.* www.ademe.fr/fondschaleur).
- L'ADEME assure le suivi des études de faisabilité, sélectionne et accompagne les projets les plus performants sur les plans énergétique, économique et environnemental.

1.4 Les unités utilisées

De nombreuses unités sont utilisées dans la filière forêt-bois et dans la filière énergie : il est souvent nécessaire de convertir les unités entre elles. Les conversions couramment utilisées sont :

1 tep (tonne équivalent pétrole) = 11 600 kWh = 3 à 5 tonnes de bois = 12 à 15 MAP

1 tonne bois = 0,2 à 0,35 tep = 1,33 m³ bois rond (à 25 % hum) = 1,20 m³ bois rond frais

1 tonne bois plaque (feuillu-résineux) à 25 % humidité = 3 600 à 3 800 kWh

1 MAP = 330 kg bois à 25 % humidité = 800 à 1 000 kWh

Équivalences d'unités

	Unité de référence	Humidité (%)	Contenu énergétique en kWh PCI	Contenu énergétique en tep
Bois bûches	1 m ³ ebr	35	2 100	0,18
	1 Stère (en 1m)	35	1 500	0,13
	1 t	35	3 000	0,26
Bois DIB	1 t	25	3 500	0,30
Écorces	1 t	50	2 200	0,19
Plaquettes forestières	1 t	45	2 500	0,22
Granulés	1 t	10	4 600	0,40
Paille	1 t	15	4 500	0,39
Farines animales	1 t	5	6 000	0,52
Fioul lourd	1 t	11 100	11 100	0,95
FOD	1 t		11 600	1
Charbon (coke de houille)	1 t		7 800	0,67
Gaz naturel	1 m ³	9	9	0,0008
Bio déchets	1 t		800	0,07

1 baril = 160 l

ebr : équivalent bois rond

L'Observatoire de l'énergie, dans le cadre de la réalisation du bilan énergétique officiel de la France (chapitres production et consommation), établit les données en millions de tep, en retenant la convention suivante :

$$1 \text{ tonne} = 1,7 \text{ stère} = 0,257 \text{ tep} = 2\,990 \text{ kWh pci}$$

Correspondance d'unités

Puissance	th/h	kcal/h	kW	kJ/h
1 th/h		1 000	1,163	4 185
1 kcal/h	0,001		0,001163	4,185
1 kW	0,86	860		3 600
1 kJ/h	0,000239	0,239	0,000278	

Énergie	th	kcal	kWh	kJ	tep
1 th		1 000	1,163	4 185	0,0001
1 kcal	0,001		0,001163	4,185	0,0000001
1 kWh	0,86	860		3 600	0,000086
1 kJ	0,000239	0,239	0,000278		2,39E-08
1 tep	10 000	10 000 000	11 626	41 850 000	

Attention à ne pas confondre MWh et MW.

Le MWh est une unité de mesure d'énergie (1 MWh = 1 000 kWh = 3,6 GJ ou GigaJoule) : elle correspond à l'énergie produite par un appareil de 1 MW de puissance pendant une durée d'une heure.

Vj ku'r ci g'lpvgpvkqpcm{ 'ighv'dn^cpm

2



Production, transformation et livraison des combustibles bois

Le bois récolté en forêt est valorisé dans trois circuits différents : le bois d'œuvre, le bois de trituration et le bois-énergie (Fig. 2.1).

Le bois d'œuvre a un vaste champ d'applications dans l'emballage bois, l'ameublement et la construction. L'utilisation du bois de trituration est rattachée à l'industrie de la pâte à papier et du panneau de particules.

Le bois-énergie est l'une des valorisations les plus anciennes du bois, notamment en tant que principale source d'énergie pour le chauffage et la cuisson des aliments. Son utilisation croissante dans les chaudières collectives et industrielles doit éviter les conflits d'usages avec les autres filières. Le bois en tant que source d'énergie doit être considéré comme la dernière valorisation possible [4].



Liste des figures

- Figure 1.1 Consommation prévisionnelle cumulée des chaufferies collectives et industrielles (engagées par l'ADEME)
- Figure 1.2 Comparaison du coût global d'une chaufferie biomasse par rapport à la solution de référence (© CIBE)
- Figure 2.1 Les différentes valorisations du bois issu de la forêt (© Biomasse Normandie)
- Figure 2.2 Évolution de la consommation de biomasse forestière pour l'énergie (© ADEME)
- Figure 2.3 Volumes de bois récoltés par usages (© FCBA)
- Figure 2.4 Méthode d'évaluation de la disponibilité supplémentaire en bois-énergie utilisée par l'IFN, FCBA et Solagro
- Figure 2.5 Les différents types de bois prélevés en forêt (© IFN)
- Figure 2.6 Carte des disponibilités brutes de BIBE en volume (© IFN)
- Figure 2.7 Carte de la classe de sensibilité chimique des sols forestiers aux exportations minérales (© IFN)
- Figure 2.8 Haie bocagère (© Biomasse Normandie)

- Figure 2.9 Élagage urbain (© Biomasse Normandie)
- Figure 2.10 Produits connexes de la première transformation du bois (© Biomasse Normandie)
- Figure 2.11 Plaquettes de scierie (© Biomasse Normandie)
- Figure 2.12 Palettes avant broyage (© Juliette Talpin)
- Figure 2.13 Bois traités non considérés comme combustibles (© Juliette Talpin)
- Figure 2.14 Récolte en tige de TTCR (© AILE)
- Figure 2.15 TCR peuplier (© Arbocentre)
- Figure 2.16 Plantation en double densité (© CAFSA)
- Figure 2.17 Association de noyers et de céréales
- Figure 2.18 Itinéraires d'approvisionnement en plaquettes forestières (© ADEME)
- Figure 2.19 Cisaille type sécateur sur pelle mécanique à chenille (© Rémi Grovel extrait du guide sur le déchiquetage)
- Figure 2.20 Broyage en forêt (© Olivier Perrenoud, ADEME)
- Figure 2.21 Broyage de haies en plaquettes bocagères (© SCIC Bois Bocage Énergie)
- Figure 2.22 Broyage sur plate-forme (© Stéphane Leittenberger, ADEME)
- Figure 2.23 Plate-forme d'Orval (Manche) de Biocombustibles SA
(© Biocombustibles SA)
- Figure 2.24 Production française de granulés de bois (© SNPGB)
- Figure 2.25 Déchiqueteuse automotrice (© UCFF)
- Figure 2.26 Déchiqueteuse portée (© Arbocentre)
- Figure 2.27 Déchiqueteuse tractée (© Arbocentre)
- Figure 2.28 Déchiquetage en bord de coupe (© UCFF)
- Figure 2.29 Principe du tambour et du disque
- Figure 2.30 Les méthodes de production des plaquettes forestières par déchiquetage d'arbres entiers (© Biomasse Normandie)
- Figure 2.31 Évolution du taux d'humidité et du pouvoir calorifique inférieur de perches de feuillus (© CTBA)
- Figure 2.32 Séchage naturel du bois déchiqueté (© CTBA, Biomasse Normandie)
- Figure 2.33 Stockage sous abri ou à l'air libre : impact sur l'humidité des plaquettes (© Thomas Thörnqvist)
- Figure 2.34 Meule tassée (© Ets Gangloff)
- Figure 2.35 Meule bâchée
- Figure 2.36 Plate-forme de COFORET (Rhône-Alpes) (© Juliette Talpin)