

La combustion du bois et de la biomasse

Yann ROGAUME*

Résumé

L'objectif de cet article est de faire un bilan succinct de la valorisation énergétique de la biomasse par combustion. La première partie est consacrée aux caractéristiques des différentes biomasses : si, globalement les caractéristiques sont semblables, des différences faibles peuvent conduire à des difficultés lors de la combustion avec par exemple des teneurs en azote ou en cendres et potassium qui peuvent être plus élevées avec les cultures énergétiques. Les différentes voies sèches de valorisation (pyrolyse, gazéification, combustion) sont ensuite présentées avec leurs différences, leurs caractéristiques et leurs applications. La combustion étant très largement la voie la plus utilisée, elle est présentée plus en détail en insistant notamment sur les règles à suivre pour qu'elle soit la plus complète possible. Dans la dernière partie générale, la biomasse et le bois sont comparés aux autres combustibles solides et liquides (charbon et fioul surtout) et les équations de combustion de la biomasse sont présentées.

La suite de l'article est consacrée à la combustion de la biomasse et plus particulièrement du bois : les différentes formes d'utilisations avec leurs avantages et inconvénients sont d'abord présentées. La formation des principaux polluants est ensuite détaillée en insistant sur le bilan du chauffage bois pour chacun d'entre eux et sur les conditions opératoires qui mènent à leur formation ou leur dégradation. Les principaux polluants formés sont constitués d'imbrûlés gazeux (CO, COV et HAP) et solides (particules, HAP), la combustion du bois ne produisant pas ou très peu de produits chlorés (dioxines, furanes, HCl), pas de produits soufrés (H₂S, SO₂) et des quantités faibles d'oxydes d'azote, excepté pour certaines biomasses riches en azote. La dernière partie est consacrée à l'optimisation de fonctionnement des appareils pour réduire les émissions polluantes et accroître le rendement énergétique. Les règles de conception et de fonctionnement à mettre en œuvre sont rappelées avec des données chiffrées et des exemples. Le respect de ces différentes lois doit permettre de concevoir et de régler un appareil pour optimiser son fonctionnement.

Abstract

This article sets out a brief assessment of the use of biomass for energy purposes by combustion. The first part deals with the characteristics of the different biomasses : even if these characteristics are roughly the same, some small differences may result in difficulties during combustion with, for example, contents in nitrogen, ashes or potassium that can be higher for fuel crops. The various thermochemical processes for enhanced values are then described with their differences, characteristics and uses. Combustion, which is considerably the most common way, is described in details. The rules to be followed in order to achieve the most complete combustion are also given. In the last general part, biomass and wood are compared to others solid and liquid fuels (charcoal and oil in particular) and the equations of biomass combustion are set out.

Then, the article deals with biomass combustion and in particular wood combustion : at first, the different sorts of uses with their advantages and drawbacks are explained. The formation of the main pollutants is then detailed and the balance for wood burning is also explained for each of them. The operating conditions that lead to the formation or the degradation of these pollutants are also described. The main pollutants are composed of unburnt gases (CO, VOC and PAH) and unburnt solids (particulate matter, PAH), as wood combustion produces no or a very little quantity of nitrogenous compounds (dioxins, furans, HCl), no sulfurated products (H₂S, SO₂) and some small quantities of nitrogen oxides, except for some biomasses with a high content of nitrogen. The last part of this paper is dedicated to the operating optimization of the devices in order to reduce the polluting emissions and to increase the energetic output. The recommendations for design and operation are given with data and examples. The respect of these different rules enables to conceive and to set a device in order to optimise its functioning.

*Université de Nancy, LERMAB – ENSTIB – 27, rue du Merle Blanc – BP 1041 – 88051 Épinal Cedex.

1. Introduction

La valorisation énergétique du bois et de la biomasse est la première source d'énergie renouvelable en France et en Europe. Au niveau européen, le bois et la biomasse représentent environ 65 % des consommations d'énergies renouvelables et en France, un peu plus de 50 %, dont 75 % de l'énergie thermique (la seconde énergie renouvelable est l'hydraulique qui produit de l'électricité). Même si de nombreux travaux de recherche et développement visent à développer de nouvelles voies de valorisation énergétique (pyrolyse, gazéification, liquéfaction...), plus de 95 % de la valorisation actuelle est réalisée par combustion directe dans des appareils de puissances et de technologies très variables. De plus, parmi les biomasses d'origines végétales, le bois est très largement majoritaire. Ainsi, dans la suite de cet article, nous traiterons principalement du bois qui servira de produit de référence, même si quelques mots sur les autres biomasses utilisables ou en développement seront donnés.

Dans la suite de ce texte, nous présenterons tout d'abord les principales caractéristiques du bois et de la biomasse intéressantes pour une valorisation par combustion, puis un paragraphe sur les différentes voies thermiques de valorisation énergétique avec une présentation plus détaillée de la combustion. Dans un troisième temps, une comparaison des combustibles biomasses avec les principaux combustibles fossiles sera proposée avant de présenter les différents combustibles bois et les appareils utilisés

pour les brûler. La dernière partie de cet article détaillera le fonctionnement de ces appareils et notamment les paramètres qui conduisent à améliorer leurs performances énergétiques et environnementales.

2. Caractéristiques physiques et chimiques du bois et de la biomasse

2.1. Composition chimique

Le bois comme les autres biomasses végétales est un produit organique constitué principalement de trois polymères qui sont la cellulose, la lignine et les hémicelluloses. La cellulose est majoritaire et représente 40 à 50 % de la matière sèche, la lignine est en quantité plus importante chez les résineux (23 à 33 %) que chez les feuillus (16 à 23 %) et les hémicelluloses sont un groupe de polymères qui représentent 10 à 30 % de la masse de matière sèche. Globalement, même si les proportions changent, la composition chimique élémentaire moyenne des bois est très stable (Tableau 1) [1, 2].

Finalement, lorsque des calculs de dimensionnement d'appareils doivent être effectués, la composition chimique élémentaire massique du bois sec approchée prise en compte est : 50 % de carbone, 44 % d'oxygène et 6 % d'hydrogène. Ainsi, la molécule de bois anhydre peut être prise à :



Tableau 1.
Composition chimique élémentaire de différentes biomasses (% massiques).

	C	H	O	N	Cl
Épicéa	51,1	5,7	43,1	0,1	0,01
Douglas	52,3	6,3	41,3	0,1	0,01
Sapin	49,0	6,0	44,9	0,1	0,01
Écorce de sapin	52,3	5,8	41,7	0,2	0,01
Hêtre	49,7	6,1	43,8	0,4	0,01
Chêne	49,5	5,4	44,7	0,3	0,01
Érable	49,5	6,0	44,3	0,1	0,01
Peuplier	49,9	6,1	43,6	0,3	0,01
Écorce de chêne	50,4	5,6	42,8	0,5	0,02
Paille de blé	45,7	5,7	41,2	0,6	0,21
Paille de maïs	46,1	5,9	40,1	0,8	0,35
Paille d'orge	44,7	5,9	44,7	0,6	0,25
Graine de blé	45,8	5,1	48,3	0,3	0,43
Graine de maïs	47,8	5,6	45,9	0,4	0,21
Graine d'orge	45,1	6,6	46,4	0,6	0,30
Miscanthus	49,0	6,0	43,8	0,6	0,15
Colza	50,5	6,3	40,2	2,1	0,45
Sorgho	47,3	5,8	46,1	0,4	0,30

2.2. Humidité

Le bois contient des quantités d'eau souvent non négligeables qui ont un impact direct sur la conception et le dimensionnement des appareils ainsi que sur la qualité de combustion : rendement énergétique et qualité des fumées notamment. Frais abattu, le bois contient environ 60 % d'eau en masse, cette teneur pouvant descendre jusqu'à environ 15 à 20 % sans séchage artificiel. Lors des utilisations en appareils de chauffage, les teneurs moyennes sont comprises entre 20 % (appareils indépendants de type poêles ou foyers fermés) et 45 % (pour les chaudières automatiques les plus puissantes). L'eau joue un triple rôle dans la combustion :

- elle ne fournit pas d'énergie car elle ne brûle pas ;
- elle pompe de l'énergie car elle doit être vaporisée dans le foyer de combustion ;
- elle peut participer à des réactions d'oxydations (notamment pour le monoxyde de carbone : $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$).

L'humidité représente la quantité d'eau par rapport à la quantité de bois. Il est ainsi possible de différencier deux méthodes de calcul qui conduisent à deux expressions différentes de l'humidité :

- l'humidité sur sec : $H_S = \frac{m_h - m_0}{m_0} \times 100$;
- l'humidité sur brut : $H_B = \frac{m_h - m_0}{m_h} \times 100$;

avec : m_h = masse de bois humide
 m_0 = masse de bois anhydre

Dans l'industrie du bois, l'humidité sur sec est souvent utilisée alors que pour l'énergie, l'humidité prise en compte est toujours l'humidité sur brut [3].

2.3. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est la quantité maximale de chaleur que l'on peut récupérer en brûlant totalement un kilogramme de bois ou de biomasse. Il convient de séparer trois pouvoirs calorifiques différents :

- le pouvoir calorifique supérieur (PCS) : il s'agit de la quantité maximale d'énergie récupérable en brûlant du bois sec et en condensant l'eau issue de cette combustion. C'est cette valeur qui est mesurée en laboratoire avec les bombes calorimétriques et qui sert ensuite de base aux calculs ;
- le pouvoir calorifique inférieur du combustible sec (PCI_S) : il s'agit de la quantité d'énergie récupérée en brûlant un kilogramme de bois sec, l'eau étant émise sous forme de vapeur ;
- le pouvoir calorifique inférieur humide (PCI_H) : c'est la quantité de chaleur récupérable lors de la combustion d'un kilogramme de bois humide, l'eau étant émise sous forme de vapeur.

Dans les appareils de combustion de bois ou de biomasse, l'énergie susceptible d'être récupérée est

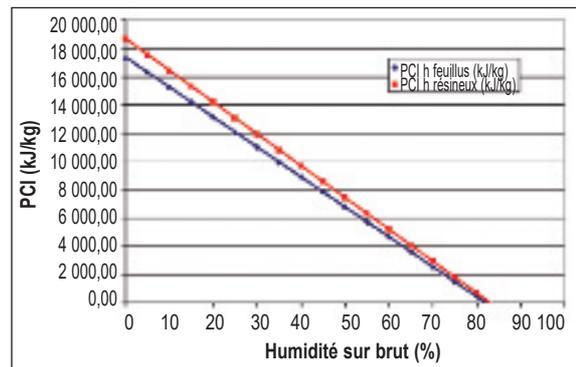


Figure 1.
Évolution du PCI_H avec l'humidité sur brut.

le PCI_H (quelques appareils à condensation existent actuellement, mais leur diffusion est très limitée et pose des problèmes de corrosion : cf. article dans ce numéro). À partir de la mesure du PCS réalisée en laboratoire sur des échantillons de bois ou de biomasses, le PCI_S et le PCI_H peuvent être déduits à partir des équations suivantes :

$$\text{PCI}_S = \text{PCS} - X_v \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{2M_H} \times \frac{H}{100}$$

$$\text{PCI}_H = \text{PCI}_S \times \frac{100 - H_B}{100} - X_v \frac{H_B}{100}$$

avec : PCI_S, le PCI sec

PCI_H, le PCI humide, ou PCI réel

PCS, le PCS sec

X_v , la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0 °C (2 500 kJ.kg⁻¹).

H, le pourcentage massique en hydrogène du combustible (en moyenne, 6 % pour le bois)

H_B , l'humidité sur brut du combustible

$M_{\text{H}_2\text{O}}$, masse molaire de la molécule d'eau (18 g.mole⁻¹ en première approximation)

M_H , masse molaire de l'atome d'hydrogène (1 g.mole⁻¹ en première approximation)

Globalement, les bois résineux ont des pouvoirs calorifiques légèrement supérieurs à ceux des bois de feuillus : moyenne de 19 700 kJ.kg⁻¹ pour les premiers et de 18 600 kJ.kg⁻¹ pour les seconds. La diminution de pouvoir calorifique inférieur avec l'augmentation de l'humidité est représentée sur la Figure 1 [2, 3].

2.4. Teneur en cendres

Les différentes biomasses contiennent des minéraux et des quantités plus ou moins importantes de métaux qui se retrouvent après combustion dans les cendres. Théoriquement, le bois contient entre 0,3 et 0,8 % de minéraux qui formeront les cendres dans les appareils. C'est aussi sur cette propriété que les

différences les plus importantes existent entre les différentes biomasses. De plus, outre la quantité, la qualité des cendres joue un rôle important dans les appareils de combustion car cela peut conduire à la production de mâchefers et/ou de corrosion. La teneur en cendres des différents combustibles biomasse est également très fortement modifiée par la présence de terre ou de cailloux en mélange : c'est par exemple le cas des écorces qui sont régulièrement chargées en terre et dont la teneur en cendres peut de ce fait dépasser 5 %.

2.5. Masse volumique

La masse volumique des différents combustibles a un impact direct sur le volume de stockage et les moyens de manutention à mettre en œuvre. Il convient aussi de différencier diverses masses volumiques :

- la masse volumique vraie des matériaux ligneux qui ne dépend que très peu des biomasses et qui est de l'ordre de $1\,500\text{ kg.m}^{-3}$;
- la masse volumique du bois ou de la biomasse anhydre qui dépend fortement de sa nature et varie de 100 à plus de $1\,200\text{ kg.m}^{-3}$;
- la masse volumique apparente des combustibles biomasses qui est très variable : de 100 kg.m^{-3} (pour les sciures, copeaux et pailles pas exemple) à près de 700 kg.m^{-3} pour les granulés.

2.6. Principales différences entre les diverses biomasses

La composition chimique des différentes biomasses est globalement assez semblable, la teneur en carbone étant comprise entre 40 et 55 %, la teneur en hydrogène entre 4 et 7 % et la teneur en oxygène entre 40 et 45 %. La principale différence chimique est la teneur en minéraux et hétéro-éléments ainsi que la nature de ces éléments. Le Tableau 1 présente quelques exemples de composition chimique massique de biomasses [4-8].

Le pouvoir calorifique est similaire pour toutes les biomasses, avec un PCS compris entre $17\,000$ et $22\,000\text{ kJ.kg}^{-1}$. La masse volumique est très variable selon les biomasses et leur granulométrie. Le pouvoir calorifique volumique varie ainsi beaucoup, ce qui augmente l'intérêt d'utiliser des feuillus, notamment sous forme de bûches, permettant d'augmenter la quantité d'énergie apportée pour un même volume. De plus, l'humidité est aussi très variable et joue un rôle très important sur le pouvoir calorifique inférieur. Le Tableau 2 présente quelques exemples de pouvoir calorifique et de teneur en cendres pour plusieurs biomasses [4-8].

Les teneurs en cendres très différentes peuvent poser des problèmes dans les appareils de combustion : des rapports de 1 à plus de 10 sont notés entre les différents combustibles.

Tableau 2.

Pouvoir calorifique et taux de cendres de différentes biomasses.

	PCS (kJ/kg)	Taux de cendres (%)
Épicéa	20 060	0,77
Douglas	21 060	0,80
Sapin	19 970	1,04
Écorce de sapin	20 430	2,90
Hêtre	19 500	1,01
Chêne	19 440	1,61
Érable	19 330	0,50
Peuplier	20 290	1,36
Écorce de chêne	16 900	3,30
Paille de blé	18 100	6,40
Paille de maïs	18 270	6,40
Paille d'orge	17 680	7,65
Graine de blé	18 150	7,27
Graine de maïs	17 900	1,20
Graine d'orge	18 820	3,00
Miscanthus	19 400	1,10
Colza	21 550	6,60
Sorgho	18 910	4,74

3. Valorisations énergétiques par voies sèches

La valorisation énergétique de la biomasse peut se faire de multiples façons ; on sépare cependant deux grands types : la voie sèche et la voie humide. La voie humide permet surtout la valorisation des sucres ou la production de liquides en utilisant des réactions chimiques en présence de liquides, souvent sous pression. Ces voies sont assez faiblement utilisées industriellement et ne seront pas traitées ici. Les voies sèches appelées également thermo-chimiques sont de trois types : la pyrolyse, la gazéification et la combustion.

3.1. Les différentes voies sèches

Ces valorisations énergétiques se déroulent à des niveaux de température plus ou moins élevés, comprises entre 300 et plus de $1\,000\text{ °C}$. Deux différences principales caractérisent les trois voies sèches : la nature du produit attendu et les conditions opératoires. La pyrolyse a pour but principal de former du charbon et se déroule sous atmosphère inerte (sans oxygène). La gazéification a pour objectif de produire un gaz de synthèse et se déroule en présence partielle d'oxygène. La combustion, quant à elle, se déroule en excès d'oxygène et a pour but d'oxyder l'ensemble du carbone et de l'hydrogène pour produire le maximum d'énergie.

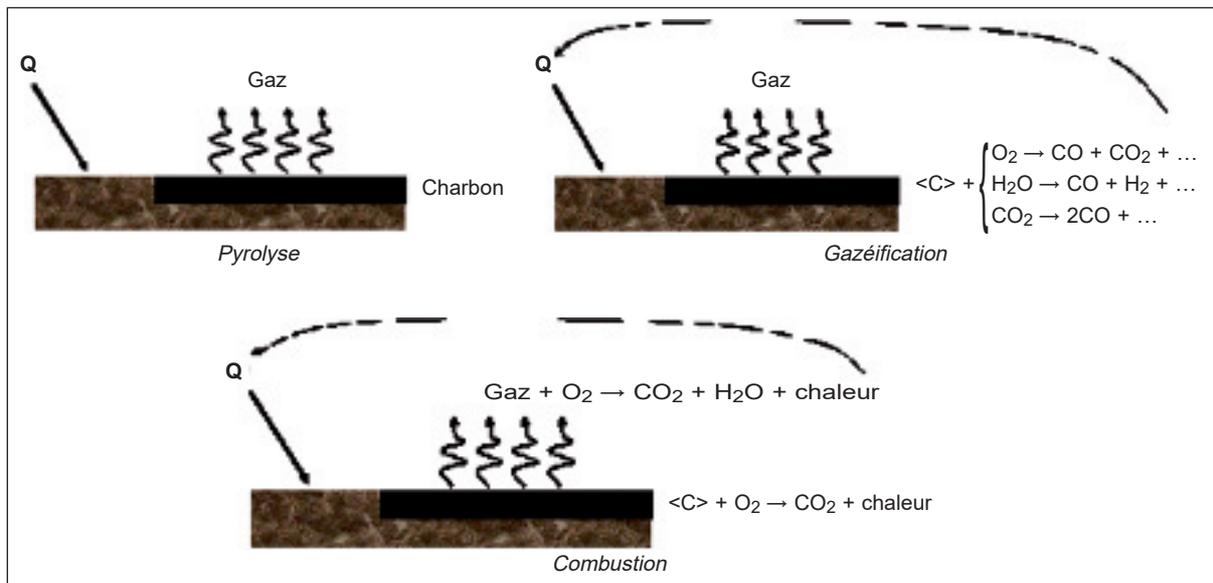


Figure 2.
Procédés de pyrolyse, gazéification et combustion.

La Figure 2 présente succinctement le principe de ces trois voies [9]. Il apparaît clairement que toutes les voies commencent par une phase de pyrolyse qui permet en chauffant le bois de le transformer en gaz et en charbon. La gazéification consiste en parallèle à attaquer le charbon formé par des produits oxygénés (air, oxygène ou vapeur d'eau par exemple) afin de transformer l'ensemble du solide en gaz d'une part et de fournir de la chaleur nécessaire à l'entretien du procédé d'autre part. Quant à la combustion, il s'agit d'oxyder l'ensemble du solide pour produire du CO₂, du H₂O et de la chaleur.

3.2. La combustion

La combustion est le procédé le plus utilisé industriellement puisqu'il représente plus de 95 % des quantités de bois utilisées pour l'énergie : la consommation est estimée à 9,5 Mtep annuelle dont moins de 0,1 Mtep est pyrolysé pour produire du charbon, le reste étant utilisé en combustion [9, 10].

Lors de la combustion, le solide (bois ou autres biomasses) est d'abord chauffé (c'est la phase dite de séchage), puis atteint une température supérieure à 300 °C à partir de laquelle la nature et la quantité des gaz libérés permet l'inflammation. Environ 80 % de la masse de solide est ainsi brûlée sous forme de gaz : c'est ce qu'on appelle la combustion homogène ou vive et qui est représentée sur la Figure 2 par l'équation ($\text{Gaz} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{chaleur}$). Les 20 % restants sont brûlés lentement par attaque de l'oxygène directement vers le charbon résiduel : ces réactions plus lentes sont appelées combustion hétérogène ou lente et sont représentées par l'autre équation ($\text{<C>} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{chaleur}$). De manière pratique, les réactions de la première phase se font dans la flamme alors que celles de la seconde phase

se font dans le lit de braises : ce phénomène est visible avec les braises qui rougissent grâce à l'énergie libérée par les réactions d'oxydation.

Ces différentes phases et réactions permettent d'expliquer la plupart des aspects pratiques rencontrés pour concevoir, régler ou optimiser le fonctionnement des appareils :

- lorsque le bois est plus humide, la quantité de chaleur nécessaire pour le séchage est plus importante, ce qui réduit le niveau de température environnant, réduisant ainsi la vitesse de combustion et limitant la combustion vive : cet enchaînement conduit à une production plus importante d'imbrûlés de type monoxyde de carbone ;
- pour améliorer la combustion vive qui représente la plus grande masse de combustible, il est intéressant d'injecter de l'air au niveau des réactions d'oxydation, donc dans la flamme : c'est l'air secondaire voire tertiaire ;
- pour améliorer la phase de combustion hétérogène, il est nécessaire d'apporter suffisamment d'oxygène au niveau du charbon, donc dans les braises : c'est pour cela que de l'air est injecté sous les grilles sur lesquelles reposent le bois le plus souvent.

Globalement, la combustion fait intervenir des aspects issus de plusieurs sciences de base qu'il est nécessaire de prendre en compte pour obtenir un équilibre et donc une bonne combustion : thermique (le chauffage du bois et les échanges thermiques permettant de récupérer la chaleur sont primordiaux), chimique (de multiples réactions chimiques sont mises en jeu et doivent être contrôlées au mieux pour réduire la formation de polluants), thermodynamique (l'ensemble des réactions et des phénomènes doivent être optimisés au niveau thermodynamique pour maintenir l'équilibre du procédé de combustion)

et mécanique des fluides (la gestion des écoulements au sein de la chambre de combustion est indispensable pour éviter la présence de zones froides ou dépourvues d'agent oxydant) [9, 12]. À partir de ces données, la règle des 4 T a pu être établie et demeure la base de toute combustion :

- température : il s'agit de maintenir un niveau de température suffisant dans toutes les parties de l'appareil pour éviter la présence de zones froides (ces zones froides conduisent à la production d'imbrûlés) et maintenir des niveaux suffisants à chaque endroit pour que les réactions de dégradation thermique (au niveau du combustible) ou d'oxydation des gaz (dans la chambre de combustion) aient lieu dans de bonnes conditions. Notons cependant qu'une température trop élevée (plus de 1 200 °C) peut poser des problèmes de formation de polluants, notamment des oxydes d'azote, voire de CO ;
- teneur en oxygène : il convient d'apporter suffisamment d'oxygène dans les différentes zones de réactions pour que tous les éléments (carbone et hydrogène principalement) puissent être oxydés : dans la zone primaire (sous la grille), l'oxygène permet d'entretenir la pyrolyse du bois et d'effectuer les réactions d'oxydation du charbon et dans la flamme, l'air secondaire permet d'oxyder l'ensemble des gaz produits par la pyrolyse pour produire le maximum de chaleur. Schématiquement, l'air primaire permet dans les appareils de gérer la puissance en régulant la perte de masse alors que l'air secondaire permet de limiter les émissions polluantes en oxydant au maximum les gaz ;
- turbulence : pour que les réactions d'oxydation aient lieu, il est nécessaire que les gaz issus de la dégradation thermique de la biomasse et l'oxygène injecté par l'air se rencontrent. Ainsi, plus le mélange entre ces différents produits est important et plus les chances d'oxydation complète sont importantes ;
- temps de séjour : même si les réactions d'oxydation sont très rapides, il est indispensable que les gaz restent entre 1 et 2 secondes minimum au sein de la

chambre de combustion pour accroître les possibilités de rencontre entre les différents gaz, dont l'oxygène. Cette condition permet de diminuer la production d'imbrûlés et de favoriser le rendement énergétique.

Même si peu de valeurs peuvent être données pour ces quatre paramètres, le bon respect de l'équilibre est primordial pour optimiser la combustion. En moyenne, le temps de séjour dans les appareils doit être d'au moins 1,5 seconde, la température moyenne au sein de la chambre doit être supérieure à 750 °C et la teneur en oxygène dans les fumées comprise entre 5 % (pour les appareils automatiques notamment) et 12 % maximum pour les appareils manuels à bûches.

4. Comparaison biomasse – autres combustibles

4.1. Principales propriétés

Globalement, la biomasse comme les autres combustibles contient du carbone et de l'hydrogène, mais ce qui la différencie le plus est sa forte teneur en oxygène. Ainsi, alors que le bois contient environ 44 % d'oxygène en masse, le pétrole n'en contient qu'environ 0,3 % et le charbon que de 1 à 10 % selon le type [11]. Ces données expliquent le pouvoir calorifique plus faible (PCS d'environ 19 000 kJ.kg⁻¹ pour le bois, de l'ordre de 40 000 kJ.kg⁻¹ pour le pétrole et de 35 000 kJ.kg⁻¹ pour le charbon) et le niveau d'oxygène à apporter différent pour la combustion d'une même masse. De plus, la biomasse est le plus souvent humide, alors que le charbon ou les produits pétroliers ont une humidité très faible, voire nulle. Enfin, la densité énergétique de la biomasse est beaucoup plus faible que celle des autres combustibles, ce qui augmente son coût de transport.

En contrepartie, la biomasse a des avantages indéniables sur les produits fossiles. Elle ne contient pas de soufre, pas de chlore et très peu d'azote, ce qui conduit à des émissions polluantes très faibles (cet avantage vaut principalement pour le bois, mais pas pour toutes les biomasses). De même, la biomasse peut être reconnue comme une énergie renouvelable à partir du moment où une quantité au moins égale à celle prélevée est replantée en parallèle : avec cette condition, le CO₂ émis lors de la combustion est identique à celui prélevé par la photosynthèse. Notons également que du strict point de vue des gaz à effet de serre, il est préférable de brûler le bois dans un appareil pour produire de l'énergie que de le laisser se dégrader dans la forêt car les gaz émis seront surtout du CO₂ alors que les réactions de compostage en forêt émettent des gaz de type méthane beaucoup plus néfaste pour l'effet de serre. La biomasse est également bien répartie sur les différents territoires, ne demande pas de systèmes d'exploitation trop importants et occasionne de faibles dépenses de transport.

Le diagramme de Van Krevelen présenté sur la **Figure 3** montre la différence de composition chimique entre les différents combustibles liquides et solides [9, 12].

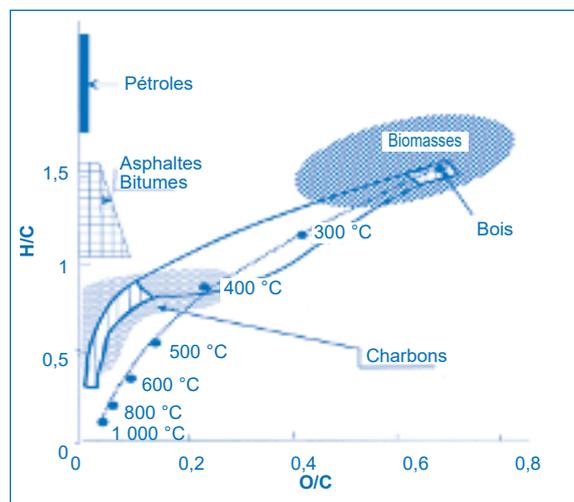
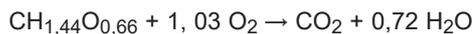


Figure 3.
Diagramme de Van Krevelen de la biomasse et des autres combustibles.

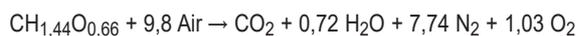
Les points avec niveaux de température correspondent à du charbon issu de la pyrolyse de bois. Ce diagramme montre clairement la forte teneur en oxygène des produits de type biomasse par rapport aux autres combustibles. La pyrolyse permet cependant de transformer la biomasse pour lui conférer des caractéristiques plus proches de celles des autres combustibles : ce genre de travail est réalisé actuellement au stade de la recherche dans le cadre de la production de biocarburants de seconde génération pour lesquels les quantités à transporter sont importantes et la densification énergétique semble être une voie d'optimisation intéressante.

4.2. Réactions de combustion de la biomasse

Le bois étant la biomasse la plus utilisée, c'est cet exemple que nous allons conserver pour écrire les équations de combustion et dimensionner les différentes entrées. En première approximation, le bois contient 50 % de carbone, 44 % d'oxygène et 6 % d'hydrogène : sa molécule peut alors s'écrire : $\text{CH}_{1,44}\text{O}_{0,66}$. La combustion neutre sous oxygène s'écrit alors :



La combustion se déroule le plus souvent sous air (qui contient 21 % d' O_2 et 79 % de N_2 en première approximation) et avec un excès d'air. Supposons alors un facteur d'air moyen de 2, qui correspond à un facteur souvent rencontré dans les installations et qui conduit à une teneur en oxygène dans les fumées sèches de 10,4 %. L'équation de combustion théorique s'écrit alors :



Connaissant le pouvoir calorifique du combustible, la puissance souhaitée de l'appareil et le rendement attendu, il est possible de déterminer le débit de combustible nécessaire :

$$m = \frac{P}{\eta \times \text{PCI}_H}$$

avec : m = débit massique de combustible ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)

η = rendement de l'appareil

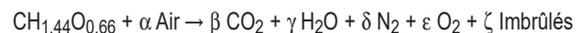
PCI_H = pouvoir calorifique inférieur du combustible humide ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)

P = puissance de l'appareil (kW)

Les débits d'air à injecter et de fumées à évacuer peuvent alors être calculés directement en considérant qu'une mole de bois pèse 24 g (il est alors possible de donner le nombre de mole de bois par seconde) et que chaque mole de bois nécessite l'apport de 9,8 moles d'air et l'évacuation de 10,49 moles de fumées humides, chaque mole faisant 22,4 Nlitres.

Ces calculs permettent ensuite de dimensionner l'ensemble des dispositifs à mettre en œuvre pour chaque type d'appareil et chaque niveau de puis-

sance. Ces réactions totales n'existent malheureusement pas dans un appareil de combustion quel qu'il soit et les réactions sont toujours incomplètes, conduisant à la formation de produits imbrûlés tels que le CO , les COV (composés organiques volatils), des particules (de différentes tailles et nature), des HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), etc. Finalement, l'équation générale de combustion de bois peut s'écrire :



5. Les différents combustibles bois

Le bois énergie est utilisé sous différentes formes, les plus connues étant les bûches, les plaquettes ou les granulés. Les consommations sont pour plus de 80 % sous forme de bûches, environ 10 à 15 % sous forme de plaquettes (forestières principalement, mais aussi plaquettes industrielles) et le reste en partie sous forme de granulés ou de sous-produits (liqueurs de papeteries, sciures, copeaux...) [10].

5.1. Les bûches

Ce combustible est certainement le plus difficile à brûler, mais possède l'avantage d'être économique et facile à approvisionner. Les bûches sont proposées en plusieurs longueurs : 25, 33, 50 et 100 cm et sont le plus souvent livrées en stères (un stère représente la quantité de bois rangée dans 1 m^3 avec des bûches de 1 m de longueur). Une norme « NF Bois de Chauffage » existe et propose de classer les bûches en fonction de l'essence et de l'humidité [13]. Cependant, plus de 90 % du marché de la bûche est réalisé en dehors de cette norme, une très grande partie étant d'ailleurs effectuée en dehors des circuits commerciaux.

Les principaux avantages des bûches sont le coût assez faible, la possibilité d'utilisation dans une multitude d'appareils (appareils indépendants, chaudières, cuisinières, ...) et la possibilité de préparer soi-même le combustible. Les principaux inconvénients résident dans la manutention assez difficile qui est aussi salissante, une teneur en humidité souvent assez élevée (temps de séchage nécessaire de plusieurs années qui n'est pas toujours respecté) et une combustion difficile à contrôler. Cette difficulté de contrôle est liée surtout à la masse importante d'une bûche dont la combustion doit ensuite être contrôlée par l'appareil : la puissance étant directement liée à la perte de masse, la combustion de bûches se fait avec des variations de production de chaleur importantes.

5.2. Les plaquettes

Les plaquettes sont de deux types : les plaquettes forestières et les plaquettes industrielles. Les premières sont issues de sous-produits des industries du bois (chutes, délignures, ...) qui sont broyées. Les secondes sont issues de sous-produits forestiers qui sont

broyés ou déchiquetés directement en forêt. La principale différence réside dans la teneur en humidité : les plaquettes industrielles sont le plus souvent relativement sèches (15 % pour des sous-produits d'industries de seconde transformation et jusqu'à 50 % pour les sous-produits issus de scieries) alors que les plaquettes forestières ont une humidité assez élevée, de l'ordre de 45 à 50 %. Elles peuvent cependant être séchées simplement en les stockant en tas pour atteindre une humidité de 25 à 30 %.

Ces combustibles sont également viables économiquement et sont très peu énergétivores à la fabrication [14]. Leur combustion est beaucoup plus aisée que celle des bûches car elles sont acheminées automatiquement au fur et à mesure des besoins dans les appareils sans maintenance difficile. Leurs principaux défauts résident dans la granulométrie et l'humidité qui doivent être bien contrôlées pour les systèmes de convoyage et le bon fonctionnement de l'appareil, ainsi que dans le coût d'investissement des appareils qui est 5 à 7 fois plus important que pour les systèmes à bûches.

5.3. Les granulés

Les granulés sont constitués de sciures agglomérées par compactage dans des presses après avoir été séchées. Ces granulés sont fabriqués sans ajout d'agents de collage, le liant étant constitué par la lignine qui fond sous l'effet de la chaleur avant de se resolidifier à la sortie de la presse. À l'heure actuelle, de multiples types de granulés existent, composés de mélanges de biomasses : le plus courant, outre la sciure, est l'utilisation de pailles ou d'écorces qui peuvent alors être mélangées en partie avec de l'amidon pour améliorer le compactage.

Les granulés ont l'avantage d'être secs (humidité moyenne de 8 %), de granulométrie constante (6 ou 8 mm de diamètre le plus souvent pour une longueur comprise entre 10 et 30 mm) et très homogènes. Leur combustion est ainsi aisée dans des systèmes automatiques ayant un coût d'investissement moins important que pour les plaquettes, mais toujours 4 à 5 fois plus chers que les appareils à bûches. Leur inconvénient principal réside dans le coût du combustible, les granulés étant les combustibles bois les plus chers : ce prix est surtout dû aux multiples opérations à mettre en œuvre pour leur fabrication.

5.4. Comparatif

Le Tableau 3 regroupe les principales caractéristiques de ces trois combustibles : la masse volumique apparente, l'humidité moyenne (gamme), le pouvoir calorifique inférieur moyen (gamme) et le coût. Les différents coûts proposés ici sont indicatifs, mais représentent l'état actuel du marché.

6. Formation des polluants

Globalement, parmi les polluants issus du chauffage à la biomasse, trois types principaux peuvent être différenciés : les imbrûlés gazeux, les imbrûlés solides (et liquides) et les polluants autres (le plus souvent des acides). Parallèlement, les cendres peuvent également poser problème au sein de la chambre de combustion, soit en créant des dépôts (mâchefers) qui obstruent les arrivées d'air, soit en créant de la corrosion dans les appareils par des dépôts piégeant les acides, notamment au niveau des échangeurs de chaleur.

6.1. Les imbrûlés gazeux

Les imbrûlés gazeux sont constitués principalement de trois composés ou familles : le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils (COV) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Globalement, le CO est un bon traceur de la qualité de combustion et sa baisse d'émission conduit le plus souvent à une limitation de celles de COV et de HAP. Les lois liant ces différentes émissions ne sont toutefois pas stables et dépendent beaucoup de l'appareil en question, de la qualité du bois utilisé et de l'utilisation de l'appareil [15, 16]. De plus, la mesure des teneurs en HAP est assez longue et complexe, même si de nouveaux protocoles sont en cours de validation [17].

La production de ces différents gaz est directement liée au bon respect de la règle des 4T présentée ci-dessus. Pour le CO par exemple, la température et la teneur en oxygène sont des paramètres très importants ; le temps de séjour et le bon mélange sont également importants, mais un peu moins que pour les COV et les HAP. Pour ces derniers, la température et le temps de séjour sont des points cruciaux qui vont permettre au moins le craquage de ces espèces

Tableau 3.
Ordres de grandeur des principales caractéristiques des combustibles bois.

	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Humidité sur brut (%)	PCI (kJ.kg ⁻¹)	Coût (€MWh ⁻¹)
Bûches	500	20 à 35 %	10 500 à 14 000	25 à 40
Plaquettes	280	25 à 45 %	8 500 à 14 000	17 à 20
Granulés	650	8 %	17 000	48 à 55

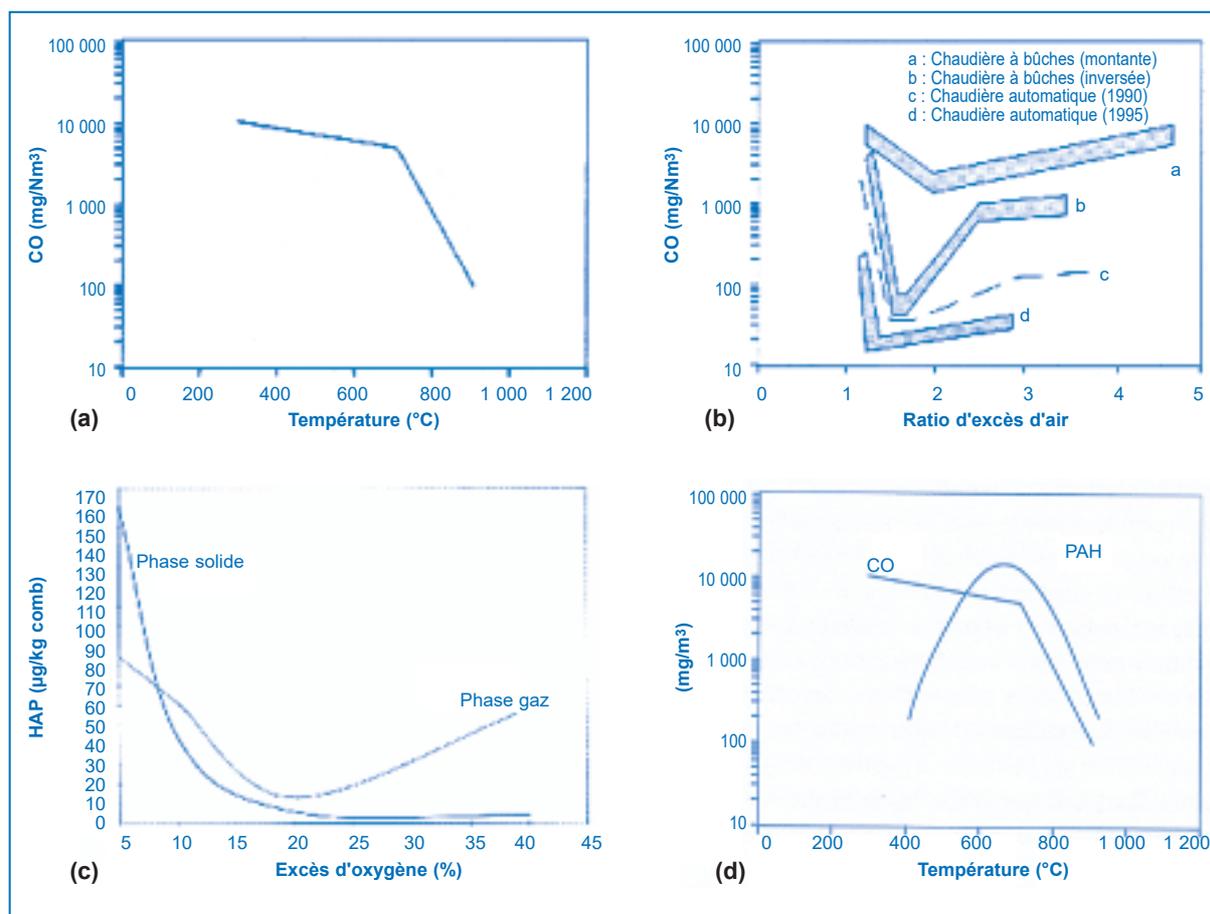


Figure 4. Émissions d'imbrûlés gazeux en fonction de l'excès d'air et de la température.

Tableau 4. Émissions de CO, COV et HAP pour différents appareils.

	CO (g/kg)	COV (g/kg)	HAP (mg/kg)	CO/COV	CO/HAP	Références
Cheminée ouverte	156,9	103,9	nd	1,51	nc	US-EPA, 1996 [21]
Poêle ancien	104,7	37,7	19,8	2,78	5,29	
Poêle nouveau	63,9	12,7	13,8	5,03	4,63	
Foyer fermé	123,0	15,0	6,5	8,20	18,92	Mc Donald, 2000 [22]
Poêle	140,0	7,5	3,2	18,67	43,75	
	CO (mg/Nm³)	COV (mg/Nm³)		CO/COV		Références
Chaudière bûches	138	11		12,55		Exemples de données du site « Label flamme verte »
	1 148	130		8,83		
	1 750	125		14,00		
Chaudière plaquettes	350	14		25,00		
	135	34		3,97		
	113	37		3,05		
Chaudière à granulés	37	1		37,00		
	64	1		64,00		
	444	6		74,00		

avant leur oxydation qui dépend elle aussi de la teneur en oxygène. Notons aussi que la présence d'eau dans le foyer est un point intéressant pour réduire la production d'imbrûlés grâce à la forte réactivité de cette molécule pour oxyder les gaz imbrûlés. Il convient cependant que cette présence ne soit pas trop importante car elle peut alors conduire à une réduction trop importante de la température.

Les courbes présentées sur la Figure 4 présentent l'effet de l'excès d'air et de la température sur les émissions de CO et de HAP [17, 19, 20].

L'ensemble de ces résultats montre qu'une température de 800 à 900 °C minimum est nécessaire, avec un facteur d'air compris entre 1,5 et 2, dépendant principalement du type d'appareil : l'excès d'air optimal est plus faible pour les systèmes automatiques de fortes puissances que pour les appareils indépendants de faible puissance. Remarquons également que quelle que soit la nature des imbrûlés, les évolutions sont semblables pour chacun, avec des niveaux optimaux assez proches. Peu de données bibliographiques existent sur les émissions de HAP et de COV des appareils indépendants, même si des études lancées par l'ADEME ces dernières années fournissent des résultats. À partir des quelques données récoltées, il est possible de mettre en place

le Tableau 4 qui regroupe des données d'émissions et présente les ratios CO/COV et CO/HAP correspondants afin de visualiser d'éventuelles relations pour différentes études réalisées en combustion de bûches pour différents appareils [21, 22].

Ces résultats montrent surtout qu'il est assez difficile de trouver des corrélations stables, les valeurs de CO/COV étant très variables en fonction des différents appareils, même pour des systèmes équivalents.

6.2. Les imbrûlés solides

Ces imbrûlés solides sont constitués principalement de particules, mais aussi de HAP condensés sur ces particules. Cet ensemble, appelé aussi aérosol, contient ainsi des solides et des liquides condensés sur ces particules. Les émissions sont aussi liées fortement à la température et au temps de séjour, mais peuvent également être dues à des envols de morceaux de bois ou de cendres. Les photographies prises au microscope électronique à balayage (MEB) de la Figure 5 présentent des exemples pour différents niveaux de grossissements [23, 24].

Ces photographies montrent une multitude d'éléments différents au sein de ce mélange de particules : certaines parties sont des morceaux de bois envolés

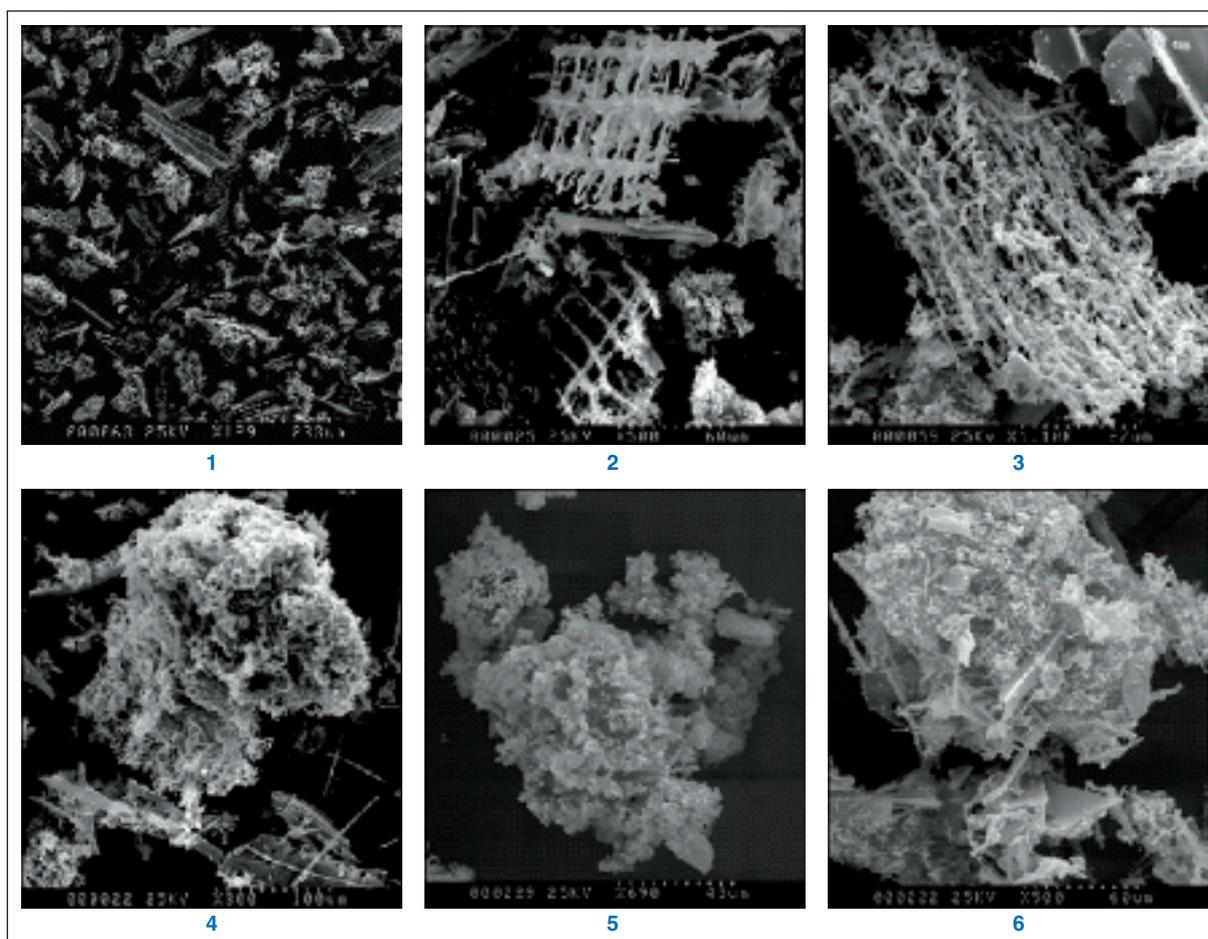


Figure 5.
Photos MEB de particules issues de la combustion de bûches en foyer fermé.

Tableau 5.
Composition chimique élémentaire de particules.

C	H	O	N	K	Cendres
63,8 %	3,1 %	~ 20 %	1,1 %	2,9 %	7,6 %

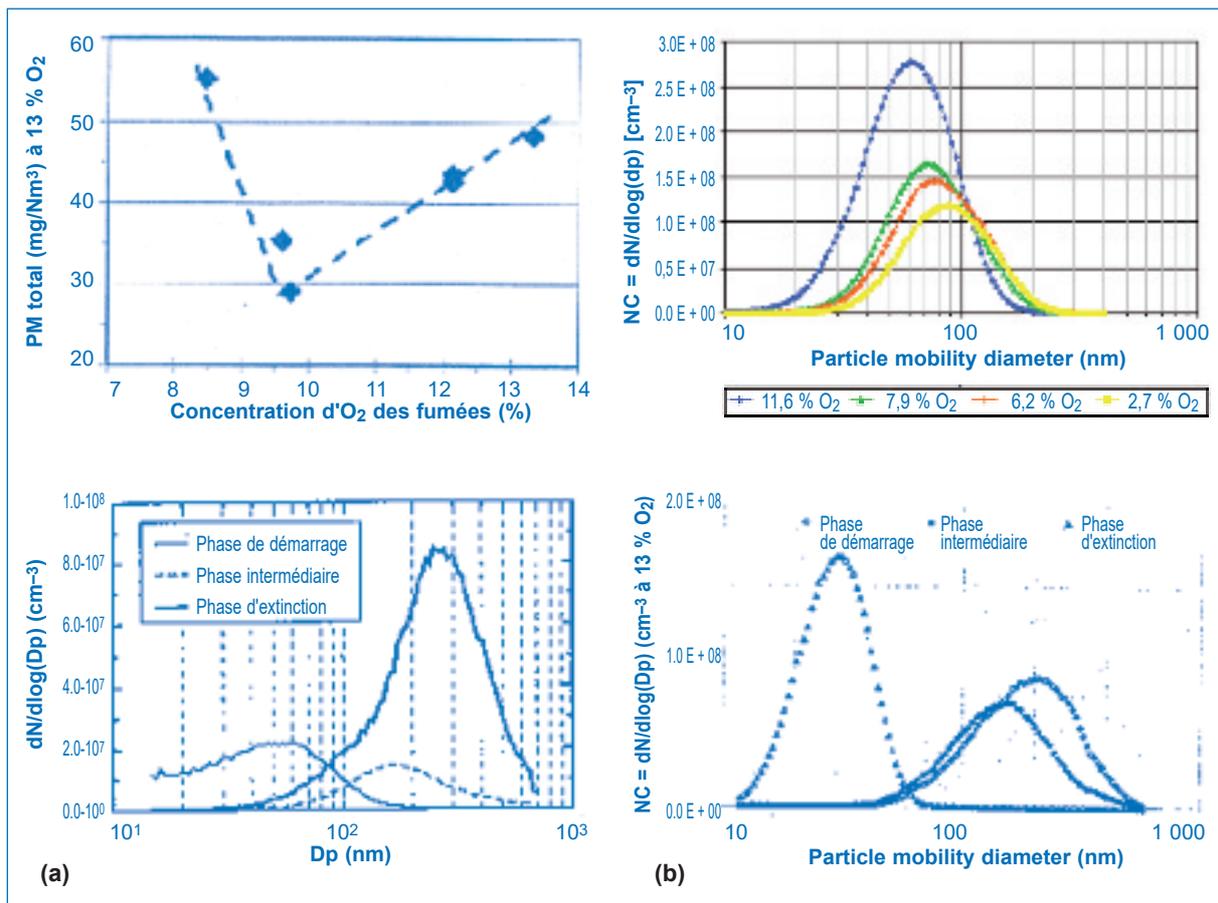


Figure 6.
Effet des paramètres de combustion sur les émissions de particules.

(exemple de la photo 2), des squelettes de bois plus ou moins dégradés (photo 3 par exemple), des suies agglomérées ou déposées sur des particules plus grosses (photos 4 et 5), ou des morceaux contenant des matières minérales (photo 6). Globalement, ces particules contiennent des quantités d'imbrûlés importantes : les mesures effectuées dans le cadre de la thèse de Marie-Laure RABOT-QUERCI [23] ont donné la composition chimique élémentaire proposée dans le Tableau 5.

Les courbes présentées sur la Figure 6 présentent l'effet des principaux paramètres sur la quantité et la taille des particules pour différents systèmes de combustion [25-27].

La première courbe montre l'effet de la concentration en oxygène sur la quantité de particules pour une

chaudière automatique à plaquettes : comme pour le CO, l'optimum est situé pour un excès d'air voisin de 2. La courbe b montre que la baisse de l'excès d'air conduit à une diminution de la teneur en particules et à l'augmentation de la taille des particules : notons qu'il s'agit ici du nombre de particules et non de leur masse, l'augmentation de taille conduisant à une augmentation de la masse, ce qui est confirmé par les résultats des courbes a et b. Les deux dernières courbes présentent l'évolution du nombre de particules en fonction des phases de fonctionnement d'un foyer à bûches :

- la phase de démarrage d'une durée de quelques minutes (moins de 10 minutes le plus souvent) émet les particules de plus gros diamètre, en nombre assez élevé ;

- la phase intermédiaire qui est la plus longue (30 à 40 minutes pour un essai d'une heure) émet des particules de taille moyenne, en plus faible quantité ;
- la phase d'extinction (durée de 10 à 15 minutes en moyenne sur 1 heure d'essai) qui émet des particules de plus petites dimensions, avec des quantités plutôt importantes.

6.3. Les autres polluants

De nombreux autres polluants existent, mais très peu peuvent être émis en quantité importante par le bois. Parmi ces polluants, on compte principalement les oxydes d'azote, les produits soufrés, les dioxines et furannes et l'acide chlorhydrique. Lors de la combustion de bois sain (bûches, plaquettes forestières, granulés de bois...), seuls les oxydes d'azote peuvent être formés : en effet, la production de produits soufrés, d'acide chlorhydrique et de dioxines et furannes sont liés directement à la présence dans le combustible de soufre ou de chlore, ce qui n'est pas le cas du bois sain.

6.3.1. Oxydes d'azote

Les émissions moyennes d'oxydes d'azote sont ainsi comprises le plus souvent entre 20 et 150 ppm à 13 % d'O₂. Par contre, la combustion de sous-produits ou d'autres types de biomasses peut conduire à la formation de ces produits.

Ainsi, la combustion de panneaux de particules et autres produits contenant de la colle peut conduire à des émissions de NO_x importantes : jusqu'à plus de 500 ppm à 13 % d'O₂. De même, la composition chimique élémentaire de pailles ou de plantes énergétiques montre des teneurs en azote 2 à 10 fois plus élevées que celles du bois, ce qui peut conduire alors à des émissions d'oxydes d'azote importantes. Des techniques existent cependant pour réduire ces émissions, mais ne peuvent être mises en place que sur des systèmes de puissances suffisantes : étagement de l'injection d'air, réduction de l'excès d'air, recirculation d'une partie des fumées, réduction de la température, injection de gaz réducteurs (méthane, ammoniac...).

6.3.2. Produits soufrés

Très peu de produits de type biomasse contiennent du soufre, ce qui rend les émissions très faibles, voire nulles la plupart du temps. La seule possibilité d'obtenir des émissions de SO₂ ou de H₂S non nulles est liée à des adjuvants de type peinture ou produit de préservation qui peuvent contenir du soufre. Il est donc important, quelle que soit l'utilisation, de ne pas utiliser de bois ou de biomasses traités ou non purs.

6.3.3. Produits chlorés

Ces produits sont constitués des dioxines et furannes et de l'acide chlorhydrique. Comme pour les produits soufrés, ceux-ci ne pourront être formés que si du chlore est présent dans le combustible de

départ, ce qui n'est pas le cas pour le bois, ou en quantités très faibles. Par contre, l'ensemble des biomasses, qui sont constituées de polymères aromatiques, possède l'ensemble des produits initiateurs de la formation de dioxines et furannes, notamment les HAP. Ainsi, si le bois ou la biomasse contient un peu de chlore, la production de dioxines et furannes est tout à fait envisageable. C'est pour cette raison que la plupart des cultures énergétiques (pailles, graines, miscanthus...) qui peuvent contenir du chlore (notamment à cause des produits phytosanitaires utilisés) sont susceptibles de conduire à la formation d'acide chlorhydrique ou de dioxines et furannes. Peu de mesures existent aujourd'hui, mais les conditions opératoires ne semblent pas avoir d'influence directe sur les émissions.

De plus, la présence de chlore conduit à des réactions de corrosion importantes dans les installations, notamment en réagissant avec le potassium et le calcium, puis avec le fer. Il est donc important pour valoriser les biomasses qui contiennent du chlore de chercher des solutions techniques : utilisation de matériaux spécifiques, ajout de produits basiques, décentrage rapide...

6.3.4. Les mâchefers

Les mâchefers sont formés par la fusion de certaines matières minérales contenues dans les cendres du foyer. La température de fusion dépend de la nature même de ces minéraux, mais aussi du mélange et de leur état : oxydation, couplage avec d'autres éléments... Quelques éléments sont cependant perturbateurs car ils diminuent la température de fusion : c'est le cas principalement du potassium. La Figure 7 présente par exemple le cas d'un mélange SiO₂/K₂O pour des proportions variant de 30 à 100 % de SiO₂ : il apparaît une variation importante de la température de fusion du mélange, de 769 à plus de 1 700 °C. Sachant que les cendres ont une composition très changeante et que plus de dix produits la composent, la détermination de cette température est très difficile.

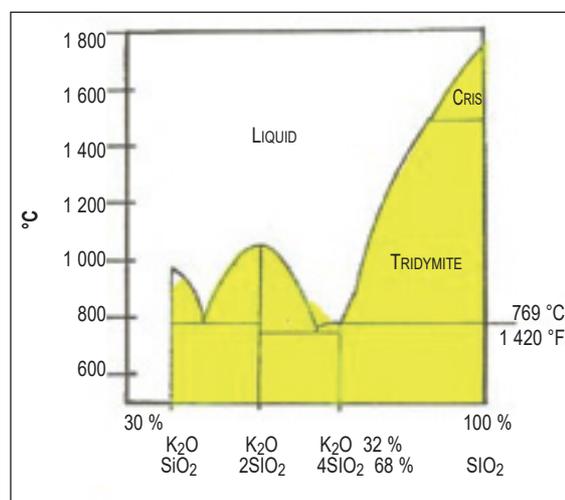


Figure 7.
Diagramme de fusion pour un mélange SiO₂, K₂O.

Les inconvénients dus à la production de mâchefers sont multiples : leur formation obstrue les arrivées d'air et bloque ainsi la combustion ; de multiples réactions ont lieu dans ces mâchefers et créent une forte corrosion des grilles ; ces mâchefers collectent une grande partie des cendres et limitent ainsi le décentrage ; ... Les solutions mises en place actuellement pour limiter cette production lors de l'utilisation de biomasses riches en potassium (cultures énergétiques principalement) sont de deux types principaux :

- mettre en place un système de décentrage efficace, robuste et rapide pour limiter le temps de séjour des cendres dans le foyer où la température est élevée ;
- mélanger ces biomasses avec d'autres ou avec des minéraux (calcaire notamment) pour augmenter la température de fusion et ainsi réduire les risques.

7. Optimisation des performances énergétiques et environnementales des appareils

L'optimisation de fonctionnement des appareils, que ce soit pour augmenter le rendement énergétique ou pour réduire les émissions polluantes repose principalement sur la bonne application de la règle des 4T, que ce soit au moment du dimensionnement et de la conception des appareils ou au niveau des réglages à mettre en œuvre. Ainsi, l'accroissement des performances est lié directement à la qualité de combustion, puis, dans un second temps, à la qualité et au dimensionnement de l'échangeur de chaleur. Il est aussi important pour optimiser le fonctionnement des appareils de prendre en compte deux niveaux assez différents, mais nécessaires qui sont le système normatif et la facilité et le confort d'utilisation sur site.

7.1. Différentes normes [28-30]

Quels que soient les appareils de combustion utilisés, des normes ont été mises en place et fixent les limitations à respecter ainsi que la méthodologie pour effectuer les essais.

7.1.1. Appareils indépendants : normes NF EN 13229, NF EN 13240 & NF EN 14785

Une norme est spécifique aux foyers ouverts, foyers fermés et inserts (NF EN 13229), la seconde est spécifique aux poêles manuels à bûches (NF EN 13240) et la dernière est spécifique aux appareils de type poêles à granulés (NF EN 14785). Globalement, le fonctionnement de ces normes est quasi-identique, seules les limitations et dans une moindre mesure les méthodes d'essais sont légèrement différentes : les normes 13229 & 13240 sont tout à fait semblables alors que la norme 14785 est légèrement différente du fait même des différences de fonctionnement des appareils (manuels à bûches

ou automatiques à granulés). Concernant le bilan énergétique, le rendement est toujours calculé comme étant égal à 100 % moins les pertes, celles-ci étant de trois sortes : pertes par chaleur sensible des fumées, pertes par imbrûlés gazeux, pertes par imbrûlés solides. L'équation globale est ainsi présentée ci-dessous, même si les équations de la norme sont différentes de celle présentée ici qui demeure plus scientifique :

$$\eta = 100 \times \frac{m_{FH} \times C_p(T_F - T_A) + 128,6 \times D_{FS} \times CO + \frac{m_{imb}}{d} \times 40\,000}{\frac{m_{bois}}{d} \times PCI_H}$$

avec :

η = rendement (%)

m_{FH} = débit massique de fumées humides (kg. h⁻¹)

D_{FS} = débit volumique de fumées sèches (Nm³.h⁻¹)

C_p = capacité calorifique massique des fumées (kJ.kg⁻¹K⁻¹)

T_F = température des fumées (°C ou K)

T_A = température de l'air (°C ou K)

CO = teneur moyenne des fumées humides en CO (% volumique)

m_{imb} = masse d'imbrûlés solides à la fin de l'essai

m_{bois} = masse de bois brûlée lors de l'essai

d = durée de l'essai (h)

Le plus souvent, la masse d'imbrûlés est très faible, voire négligeable, ce qui fait que les principaux paramètres pour augmenter le rendement sont la réduction du débit de fumées, la baisse de la température moyenne des fumées et la réduction des émissions de CO. Les teneurs en CO étant le plus souvent assez faibles (moins de 0,3 %), les pertes par imbrûlés gazeux sont faibles : en prenant par exemple une teneur en CO de 0,3 % et un volume de fumées sèches de 9 Nm³.kg⁻¹ de bois brûlé (facteur d'air de l'ordre de 2), les pertes représentent seulement 2,4 %. Par contre, les pertes par chaleur sensible des fumées sont très importantes et représentent la plus grande partie. En utilisant l'exemple précédent avec des températures moyennes de fumées de 250 °C (valeurs assez classiques pour ce type d'appareils) et un débit de fumées humides de 10 Nm³.kg⁻¹ de bois brûlé, les pertes seront alors de 19 %.

Les deux paramètres les plus importants pour réduire les pertes et donc améliorer le rendement sont donc la réduction de la température des fumées et la réduction du débit de fumées. Ainsi, si dans le même exemple que précédemment, la température des fumées est de 150 °C (en maintenant le même excès d'air), les pertes de rendement ne sont plus que de 11 % et si le volume de fumées humides par kilogramme de bois passe à 7 Nm³.kg⁻¹ de bois brûlé, ce qui correspond à un facteur d'air de l'ordre de 1,6 (la température des fumées étant de 250 °C), les pertes de rendement ne sont que de 13 %.

Concernant les émissions polluantes, seul le suivi du CO est obligatoire, les émissions étant corrigées à

13 % d'O₂. Pour les appareils manuels, plusieurs classes d'appareils existent dont seule la classe 1 est fortement représentée actuellement : les émissions maximales sont alors de 0,3 % en moyenne sur l'essai. Pour les poêles à granulés, les limitations sont respectivement à 0,04 et 0,06 % selon que le fonctionnement est réalisé à allure nominale ou réduite. Les limitations de rendement sont également légèrement différentes : pour les appareils manuels, la classe 1 demande un rendement minimum de 70 %, alors que pour les appareils automatiques, les réglementations sont respectivement de 75 et 70 % respectivement pour un fonctionnement à allure nominale et réduite.

7.1.2. Chaudières : NF EN 303-5

Pour les chaudières, la norme en vigueur pour les appareils de puissance inférieure à 300 kW est la norme NF EN 303-5 qui fixe des limitations d'émissions en CO, COV et particules totales, ainsi qu'un minimum de rendement. Les émissions polluantes sont corrigées à 10 % d'O₂ et sont présentées en mg de polluant par Nm³ de fumées. Pour le rendement, celui pris en compte est le rendement de l'installation qui prend ainsi en compte le rendement de combustion (calcul identique au précédent) et le rendement de l'échangeur de chaleur : ainsi la mesure du débit d'eau et des températures à l'entrée et à la sortie de la chaudière permettent de déterminer directement la puissance délivrée qui sera divisée par la puissance fournie par la biomasse (débit × PCI). Une différence de performance est demandée selon que l'appareil est manuel ou automatique et en fonction du niveau de puissance des chaudières. Les réglementations étant présentées dans le Tableau 6.

La réduction des émissions polluantes passe une nouvelle fois par une bonne application de la règle des 4T aussi bien lors de la conception que pour les réglages de fonctionnement. Il est également possible pour réduire les émissions de particules de mettre en place des systèmes de traitement tels que des cyclones qui sont simples et robustes et permet-

tent d'en piéger une partie importante. L'optimisation du rendement passe surtout par l'amélioration des performances de l'échangeur de chaleur.

7.1.3. Autres normes

Pour les appareils de plus fortes puissances, une série de normes et de réglementations existent, avec de multiples différences en fonction des utilisations de la chaleur et de la qualité des biomasses. De plus, de multiples réglementations peuvent souvent être appliquées dans le même temps : il est ainsi conseillé pour ces installations de prendre contact avec les délégations régionales des DRIRE qui pourront orienter les entreprises et collectivités vers les bonnes références normatives et réglementaires.

7.2. Optimisation de la conception des installations

L'optimisation énergétique et environnementale des appareils de combustion de biomasse ne peut être réalisée qu'en améliorant la conception et le dimensionnement de ceux-ci, puis en mettant en place les meilleurs réglages [12, 16, 18]. Comme nous avons pu le voir précédemment, le bon respect de la règle des 4T est le point crucial pour obtenir les bonnes performances. Lors de la phase de conception, il s'agit alors de choisir la géométrie et les dimensions adaptées :

- température : pour maintenir un niveau de température suffisamment élevé, trois points clés doivent être respectés : utiliser les matériaux adaptés (béton réfractaire, fonte, ...), adapter le volume de la chambre de combustion à la puissance de l'appareil pour limiter les pertes (cf. temps de séjour) et adapter la géométrie pour éviter toute possibilité de création de zones froides ;
- teneur en O₂ : il s'agit ici seulement d'adapter la taille de chaque entrée d'air (si le système fonctionne en tirage naturel) ou de bien dimensionner les ventilateurs (si le système fonctionne en air pulsé). Il convient également de prévoir une répartition de l'air qui permette d'injecter entre 20 et 40 % de l'air total en air secondaire ;

Tableau 6.
Limitations de la norme NF EN 303-5.

Chargement	Puissance utile nominale QN (kW)	Limites d'émissions									Rendement η (%)		
		CO			OGC			Poussières					
		(mg/Nm ³ à 10 % de O ₂)*									c1	c2	c3
		c1	c2	c3	c1	c2	c3	c1	c2	c3			
Manuel	≤ 50	25 000	8 000	5 000	2 000	300	150	200	180	150	$\eta = 67 +$	$\eta = 57 +$	$\eta = 47 +$
	> 50 à 150	12 500	5 000	2 500	1 500	200	100	200	180	150			
	> 150 à 300	12 500	2 000	1 200	1 500	200	100	200	180	150			
Automatique	≤ 50	15 000	5 000	5 000	1 750	200	100	200	180	150	6 log QN	6 log QN	6 log QN
	> 50 à 150	12 500	4 500	2 500	1 250	150	80	200	180	150			
	> 150 à 300	12 500	2 000	1 200	1 250	150	80	200	180	150			

* Se rapporte aux produits de combustion secs, 0 °C, 1 013 mbar.

- turbulence : pour améliorer le mélange entre les gaz issus de la dégradation de la biomasse et l'air, il est intéressant d'augmenter les vitesses et d'injecter l'air secondaire dans des zones à vitesses élevées. La chambre de combustion doit ainsi être dessinée pour obtenir ces conditions, tout en conservant un volume suffisant pour que les réactions aient lieu : l'injection d'air secondaire doit être effectuée suffisamment tôt dans la flamme afin que la température soit assez élevée et permette les réactions d'oxydation des imbrûlés ;
- temps de séjour : la chambre de combustion doit avoir un volume suffisant pour que les gaz à température moyenne résident entre 1 et 2 secondes en son sein. En première approche, la température moyenne de combustion des différentes biomasses est de l'ordre de 600 à 750 °C selon les systèmes et on peut donc supposer que le volume de la chambre de combustion soit comprise entre 3 et 6 litres par kW de puissance utile. Notons que pour les appareils à bûches, le volume de la chambre de combustion doit aussi prendre en compte le volume occupé par les bûches au moment du chargement.

Les autres règles de conception dépendent beaucoup du combustible utilisé. Il est ainsi très important de rendre l'installation simple et robuste, notamment pour les appareils automatiques. Si la biomasse utilisée est par exemple susceptible de conduire à la production de mâchefers, il faut que le dispositif de décendrage soit adapté ; de même, un appareil conçu pour brûler un combustible humide sera équipé de masses importantes de réfractaire (pour maintenir un niveau de température élevé) et ne conviendra donc pas à la combustion de biomasses sèches, etc. Il en est de même des dispositifs de convoyage qui dépendent directement de la granulométrie et doivent être adaptés, tout comme le silo qui peut être très simple pour des granulés, mais nécessite un système de désilage pour les plaquettes.

Un autre point important concerne la régulation de fonctionnement qui doit être adaptée à l'utilisation lors de la conception. La plupart des appareils vendus fonctionnent avec des bûches et en tirage naturel : la régulation est alors le plus souvent très sommaire. Pour les appareils indépendants, il y a simplement un volet d'ouverture d'air qui peut être réglé directement par l'utilisateur et pour les chaudières, un calorstat ouvre plus ou moins le volet d'injection d'air primaire pour obtenir une température de l'eau de chauffage relativement constante. Pour les systèmes automatiques, des régulations plus ou moins complexes existent, le plus souvent régulées à partir de deux sondes : une sonde de température de l'eau de chauffage qui indique le niveau de puissance à fournir et agit directement sur le débit de combustible et d'air primaire, puis une sonde de mesure de la teneur en oxygène (appelée souvent sonde lambda) qui permet de réguler le débit d'air secondaire (ou total selon les systèmes) afin de maintenir un excès d'air constant lors de la combustion.

7.3. Optimisation des réglages de fonctionnement

Si la phase de conception est primordiale pour adapter l'appareil à son utilisation future, le bon réglage des paramètres de combustion est tout aussi important pour que les performances mesurées correspondent à celles envisagées [3, 31]. Là encore, le bon respect des 4 T représente la règle de base qu'il faut suivre :

- température : la seule influence possible par les réglages concerne les débits de combustible et d'air qu'il faut adapter pour maintenir une température suffisante. Cependant, ce paramètre est plus tributaire de la conception que des réglages ;
- teneur en O₂ : les réglages peuvent ici avoir une importance considérable, tant au niveau du débit total d'air à injecter que de la répartition à mettre en œuvre. Selon les appareils, la teneur en oxygène des fumées sèches doit être comprise entre 5 % (pour les appareils automatiques de fortes puissances) et 12 % maximum (pour les appareils indépendants à bûches). Globalement, la teneur en oxygène résiduelle dans les fumées est une fonction décroissante de la puissance et de l'automatisation de l'appareil. La répartition air primaire/air secondaire doit être comprise entre 85/15 et 60/40 % si possible, le débit d'air secondaire étant le plus souvent trop faible dans les appareils, alors qu'il est important pour améliorer le mélange et fournir la quantité suffisante ;
- turbulence : c'est principalement la conception de l'appareil qui permet d'améliorer ce paramètre. Les réglages peuvent simplement accroître un peu le mélange, le plus souvent en injectant le plus d'air secondaire possible, voire si nécessaire, en mettant en place des dispositifs de déflecteurs au sein de la chambre de combustion ;
- temps de séjour : les réglages ne peuvent pas vraiment modifier ce paramètre, si ce n'est en augmentant ou réduisant le niveau de puissance afin de compenser si besoin les erreurs de conception en adaptant la puissance au volume de la chambre de combustion.

La maintenance de l'appareil est également une fonction importante : il est important de ne jamais obstruer totalement les entrées d'air dans un appareil et de le décendre régulièrement afin d'éviter la production de mâchefers et de laisser circuler convenablement l'air et les fumées dans celui-ci. Pour les chaudières, il convient aussi d'adapter le circuit de distribution de la chaleur, par exemple en faisant fonctionner la chaudière à une température d'eau supérieure à 65 °C. Si nécessaire, un ballon de mélange peut être mis en place pour une distribution d'eau chaude à un autre niveau de température, ou mieux encore, un ballon tampon qui stockera l'énergie produite pendant une phase de fonctionnement continu pour la distribuer ensuite pendant plusieurs heures alors que la chaudière sera à l'arrêt : cette technique est notamment très intéressante pour les chaudières à bûches.

8. Conclusion

La biomasse, qui est la première source d'énergie renouvelable en France et en Europe possède de multiples qualités et peut permettre de répondre à de nombreux enjeux énergétiques : production de chaleur, d'électricité, de gaz naturel de substitution ou de biocarburants. À l'heure actuelle, la très grande majorité des quantités de biomasses à usage énergétique est constituée par le bois qui est brûlé dans des appareils domestiques (7 à 8 MTep depuis plus de 20 ans). Au fur et à mesure des développements, des appareils de plus en plus performants et simples d'utilisation (appareils automatiques par exemple) sont apparus et proposent d'une part un confort d'utilisation optimum, et d'autre part peuvent permettre de diversifier l'approvisionnement : production de granulés de pailles ou autres par exemple. Si ces techniques sont intéressantes et prometteuses, elles se heurtent à deux points clés : le coût de ces installations demeure élevé aujourd'hui et des problèmes techniques peuvent apparaître dès lors que ce n'est plus du bois seul qui est utilisé.

De plus, le développement du nombre d'appareils de chauffage au bois vendus fait naître des inquiétudes auprès de certaines institutions ou d'une partie de la population quant à la production de polluants. Si comme toute combustion, celle du bois est génératrice de polluants, un certain nombre de fausses idées circulent, des études sont réalisées par l'ADEME pour faire des bilans et des efforts importants sont mis en place par des professionnels pour optimiser le fonctionnement de leurs appareils. Notons d'abord que le bois ne contient ni chlore, ni soufre, ce qui évite toute

production d'acide chlorhydrique, de dioxines, de furannes, de H₂S ou de SO₂ par exemple. Ajoutons que ce n'est pas le cas de toutes les biomasses et que la plupart des cultures énergétiques peuvent contenir un peu de chlore notamment, les appareils de combustion devant alors être équipés en conséquence. De même, le bois contient très peu d'azote, sa combustion étant ainsi très faiblement productrice de NO_x ; là encore, la plupart des cultures énergétiques contiennent des quantités d'azote plus importantes, mais des techniques de réduction existent et permettent de limiter les émissions d'oxydes d'azote lors de leur combustion. Les principales pollutions liées au chauffage au bois sont les HAP et les particules, notamment les particules fines. Des quantités de CO ou de COV non négligeables peuvent aussi être émises, mais l'amélioration des performances des appareils tend à réduire considérablement ces impacts. Pour les HAP et les particules, de nombreux travaux sont en cours dans les laboratoires de recherche et chez les industriels pour optimiser la combustion et développer des systèmes de traitement adaptés permettant de réduire les émissions.

La bonne conception et les bons réglages de fonctionnement des appareils demeurent cependant les paramètres les plus importants pour optimiser les performances des appareils, tant au niveau du rendement énergétique que de la réduction des émissions polluantes. Ainsi, le respect de quelques règles de combustion (règle des 4 T notamment) peut permettre de réduire de plus de 50 % les émissions polluantes et des gains énergétiques compris entre 2 et plus de 10 % de rendement.

References

1. Deglise X, Donnot A. Bois énergie. Techniques de l'ingénieur 2004, Génie énergétique, BE 8 535 : 28 p.
2. Rogaume Y. Cours ingénieur ENSTIB. Cours de combustion, 2007.
3. Rogaume Y. Production de chaleur à partir du bois. Techniques de l'ingénieur 2005, Génie énergétique, BE 9 747 : 20 p.
4. Reisinger K *et al.* Biobib: a database for biofuels. 2008. www.vt.tuwien.ac.at
5. Livingston WR. Straw characteristics. Babcock energy limited 1991, DE 92519748 : 23 p.
6. Milles TR, Miles Jr TR, Baxter L, Bryers B, Jenkins M, Oden L.L. Alkali deposits found in biomass power plants; a preliminary investigation of their extend and nature. 1995. NREL/TP – 433-8142 : 82 p.
7. Illerup JB, Rathmann O. CO₂ gasification of wheat straw, barley straw, willow and giganteus. Rosoe, Denmark, 1996. Risoe-R-873(EN) : 32 p.
8. Hector G. Caractérisation de diverses biomasses. Rapport interne de Master Recherche, LERMAB, 2008.
9. Rogaume Y. Valorisation énergétiques de la biomasses par voies sèches. Cours ENSTIB orientation énergie et environnement, 2008.
10. ADEME. Programme national bois énergie 2000-2006 ; rapport d'activité 2000-2005. 2008 : 116 p.
11. Association amicale des anciens élèves de l'École thermique. Aide-mémoire du Thermicien A³.E².Th. Institut français de l'énergie, Éditions européennes thermique et industrie 1982, ISBN 2-85933-013-5 : 428 p.
12. Van Loo S, Kopperjean J. Handbook of biomass combustion and co-firing. Twenty University Press, ISBN 9036517737, 348 p., 2002.

13. Norme « NF Bois de Chauffage », AFNOR, mise en place par le CTBA, 2001.
14. ADEME. Bilan environnemental du chauffage domestique au bois. Note de synthèse, 2005 : 14 p.
15. Collet S. Émissions liées à la combustion du bois par les foyers domestiques – Rapport Ineris. Ineris, mai 2002 : 70 p.
16. Rogaume Y. Émissions polluantes liées à la combustion de bois dans les appareils indépendants. Rapport pour le Syndicat des énergies renouvelables, 2007 : 36 p.
17. Dufour A, Girods P, Masson E, Normand S, Rogaume Y, Zoulalian A. A comparison of two methods of measuring wood pyrolysis tars. *Journal of Chromatography A* 2007 ; 1164 (2) : 240-7.
18. Nussbaumer T. Furnace design and combustion control to reduce emissions and avoid ash slagging. International Energy Agency. Biomass combustion activity, Final report of the triennium 1995-1997 T13, 1998.
19. Nussbaumer T. Emission from biomass combustion. International Energy Agency, Biomass agreement, Task X: biomass utilization, Final report of the triennium 1992-1994, 1994.
20. Gulyurtlu I, Karunatatne DG, Cabrita I. The study of the effect of operating parameters on the PAH formation during the combustion of coconut shell in a fluidised bed – *Fuel*, 82, 2003 : 215-23.
21. US-EPA. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Fifth Edition, Volume I : Stationary Point and Area Sources – Rapport de U.S. Environmental Protection Agency – 1996.
22. McDonald JD, Zielinska B, Fujita EM, Sagebiel JC, Chow JC, Watson JG. Fine particle and gaseous emission rates from residential wood combustion. *Environmental Science & Technology* 2000 ; 34 : 2080-91.
23. Rabot-Querci ML. Étude d'un dispositif de traitement des imbrûlés des appareils de chauffage indépendants au bois. Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré – Nancy I, 2006.
24. Bernard C, Rabot-Querci ML, Rogaume Y, Rogaume C, Zoulalian A. Optimization of combustion for a sustainable development of wood energy. *Frontiers Energy Research*, Art. n° 9, Debra C. Downing, Pub. Science Publishers, ISBN1600212792, 2006.
25. Hueglin C, Gaegauf C, Künzel S, Burtscher H. Characterization of wood combustion particles: Morphology, mobility and photoelectric activity. *Environmental Science & Technology* 1997 ; 31 : 3439-47.
26. Gaegauf C, Wieser U, Macquat Y. Field investigation of nanoparticle emissions from various biomass combustion systems. *Aerosols from Biomass Combustion*, International Seminar IEA Bioenergy Task 32, Zürich, Switzerland, 2001 : 81-5.
27. Zuberbühler U, Baumbach G, Straub D *et al.* Fine particle emissions from wood combustion in different firing systems. 6th International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, 2001 : 1277-80.
28. Foyers ouverts et inserts à combustibles solides, exigences et méthodes d'essais. Norme NF EN 13229, AFNOR 2002.
29. Foyers ouverts et inserts à combustibles solides, exigences et méthodes d'essais. Norme NF EN 13240, AFNOR 2002.
30. Chaudières de chauffage, partie 5 : chaudières spéciales pour combustibles solides, à chargement manuel et automatique, puissance utile inférieure ou égale à 300 kW – Définitions, exigences, essais et marquage. Norme NF EN 303-5, AFNOR 1999.
31. Bernard C. Caractérisation et optimisation de la combustion de bois fragmenté en chaufferies automatiques. Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré – Nancy I, 2005.