

Etat de l'art et positionnement du sujet

La conception d'un micro-cogénérateur aux granulés de bois relève de la production d'énergie – sous forme de chaleur et d'électricité – à partir d'un combustible solide : les granulés de bois. Le dispositif envisagé est constitué d'un système de combustion (une chaudière automatique aux granulés de bois) et d'un système de production d'électricité (une micro-turbine à air chaud). L'objectif de cette partie est de permettre au lecteur de se familiariser avec le combustible, la production de chaleur à partir de celui-ci et le principe de la micro-cogénération avant de positionner le projet.

La première partie de l'état de l'art est consacrée au combustible, la connaissance de celui-ci étant primordiale pour réaliser la conception d'un système de production d'énergie. En deuxième partie, la production de chaleur à partir du bois est abordée, notamment au travers de la description des différentes voies thermochimiques (pyrolyse, gazéification et combustion) de conversion du bois en un vecteur énergétique et de la présentation du fonctionnement des chaudières. Enfin une dernière partie traite de la micro-cogénération, notamment de son principe et de ses intérêts. Quelques exemples de micro-cogénérateurs bois sont ensuite donnés à titre informatif, un appareil utilise la technologie de la turbine à air chaud pour une puissance électrique de 80 à 105 kWe [6] et à ce jour aucun dans la gamme de puissance étudiée.

1. Les granulés de bois comme combustible

La conception d'un micro-cogénérateur aux granulés de bois passe par la connaissance du combustible, les granulés de bois. Le matériau qui compose le combustible est le bois et la mise en forme du combustible est le granulé. Une première partie est donc consacrée au matériau bois, sa ressource, son anatomie, sa composition chimique, et enfin ses propriétés pour la production d'énergie. La deuxième partie est consacrée aux granulés de bois en présentant ses avantages et inconvénients face aux différents combustibles bois, la production de granulés en France et enfin une rapide présentation d'un procédé de fabrication.

1.1. Le matériau bois

Le bois est utilisé comme combustible de façon ancestrale. Ce fut d'ailleurs le principal combustible utilisé en industrie avant l'avènement du charbon et des autres combustibles fossiles. Le bois est la première énergie renouvelable en France, elle représente 39.8% de la production primaire d'énergies renouvelables et plus de 75% de la production primaire de chaleur d'origine renouvelable [2].

1.1.1. Ressource liée à la production d'énergie en France

Cette partie a pour objectif de présenter la ressource disponible en bois à destination du secteur énergétique en France. Le bois comme source d'énergie fait débat et les principales questions posées portent sur le risque de déforestation pour la production d'énergie ainsi que sur les tensions qui existent entre le secteur de l'énergie et celui de l'industrie, notamment du panneau de particules et de la pâte à papier qui utilise le même type de ressource. Il est donc important de présenter l'état

des lieux de la forêt française afin de montrer la ressource disponible. Le bois à destination de l'énergie provient majoritairement des résidus de la sylviculture, à moindre importance de la filière de transformation (plaquettes forestières, sciures et plaquettes de scierie, etc...) et de plus en plus de produits en fin de vie.

1.1.1.1. Etat des lieux de la forêt française

Selon l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (Food and Agriculture Organisation of the United Nations : FAO) une forêt est « *un couvert arboré de plus de 10% sur au moins un demi-hectare. L'arbre étant défini comme une plante pérenne avec une seule tige (ou plusieurs si elle est recépée) atteignant au moins cinq mètres à maturité.* »

La forêt recouvre 31% de la surface du territoire français avec, en 2015, 17M ha. Les territoires forestiers sont en croissance et ont augmenté de manière régulière de 0,7% par an entre 1990 et 2015. La majorité de la forêt française se régénère naturellement soit 88,4% du territoire forestier, cette régénération est en constante progression et la superficie concernée a augmenté de 0,6% entre 2009 et 2015. Les surfaces de forêt plantées ont augmenté mais cela est surtout lié à la tempête de 1999 qui fût suivi d'une grande campagne de reboisement (+2,8% entre 2000 et 2005). Le potentiel de matériel sur pied s'élevait à 173 m³/ha en 2015 soit 2935M m³ avec une croissance annuelle de 5,5 m³/ha depuis 1990. La forêt française est majoritairement constituée de feuillus à 64,5%. La croissance des feuillus est plus importante que pour les résineux, 3,4 m³/ha/an contre 2,1 m³/ha/an. Le dernier bilan sur la diversité des espèces d'arbre rencontrées date de 2010, la France possède une forêt contenant une grande diversité, les deux espèces les plus présentes représentent seulement 34%. [7]

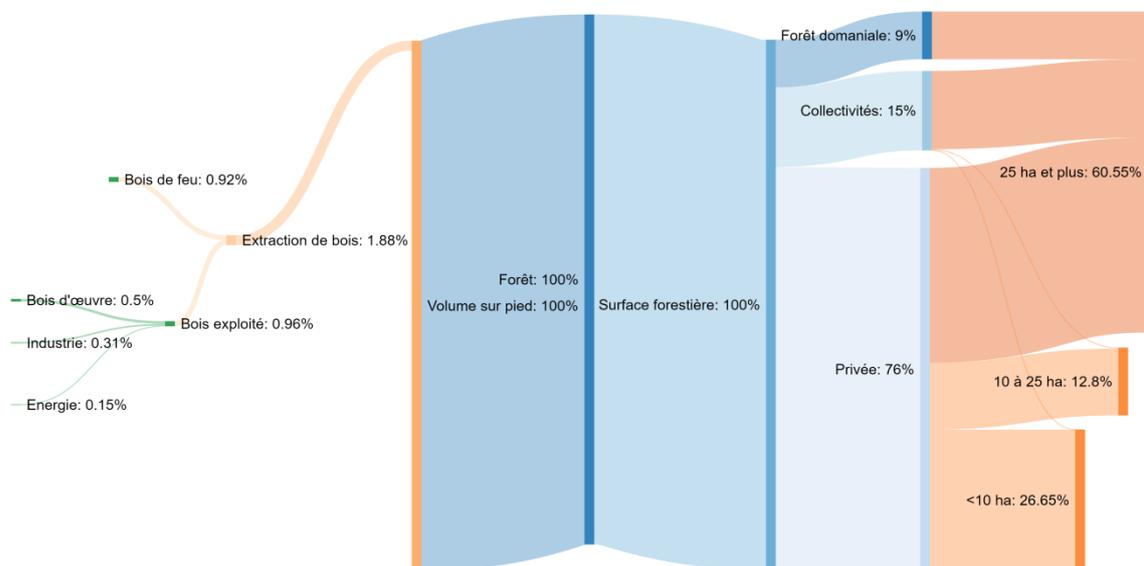


Figure 1 : Diagramme de Sankey présentant le fonctionnement de la forêt française, réalisé à partir des données de [7-9].

Le diagramme de Sankey présenté en Figure 1 met en relation la ressource forestière, son utilisation et sa gestion. La majorité des forêts françaises appartient à des propriétaires privés et les exploitations peuvent être de petite taille. La surface moyenne par propriétaire est de 3,4ha. Il est

donc difficile de maîtriser la totalité de la production des forêts privées. Le volume de bois prélevé par an dans la forêt française est très faible, mais attention c'est un pourcentage par rapport au volume total sur pied et non par rapport au volume prélevable annuellement. La quantité de bois directement destinée à la production d'énergie (chauffage domestique) en sortie de forêt représente 48% de la totalité des produits extraits. C'est une donnée difficile à quantifier réellement car c'est en grande partie de l'autoconsommation ou de la vente non surveillée. Le reste du bois exploité va être utilisé en bois d'œuvre (majoritairement), d'industrie (papier, panneau, etc...) et une dernière part pour l'énergie via des circuits commerciaux (Chaudières collectives, chaudières industrielles, cogénération, etc...).

1.1.1.2. Ressource provenant de la transformation du bois et de produits bois en fin de vie

La ressource provenant de la filière de première transformation du matériau bois est aussi appelée « *connexes et sous-produits de l'industrie de première transformation* ». Ces sous-produits sont constitués de : sciures, écorces, copeaux, dosses, délignures, chutes de tronçonnage, etc. Ces produits ne contiennent aucun adjuvant ni traitement. L'usage de ces résidus pour la production d'énergie est en concurrence avec les industriels du papier et les fabricants de panneaux. Le graphique Figure 2 présente l'exemple de la répartition des connexes et sous-produits de l'industrie de première transformation en Lorraine en 2006. Les industries du panneau et du papier utilisent plus de 80% des produits connexes. La section « *Autre* » englobe la part autoconsommée par les scieries pour les besoins internes.

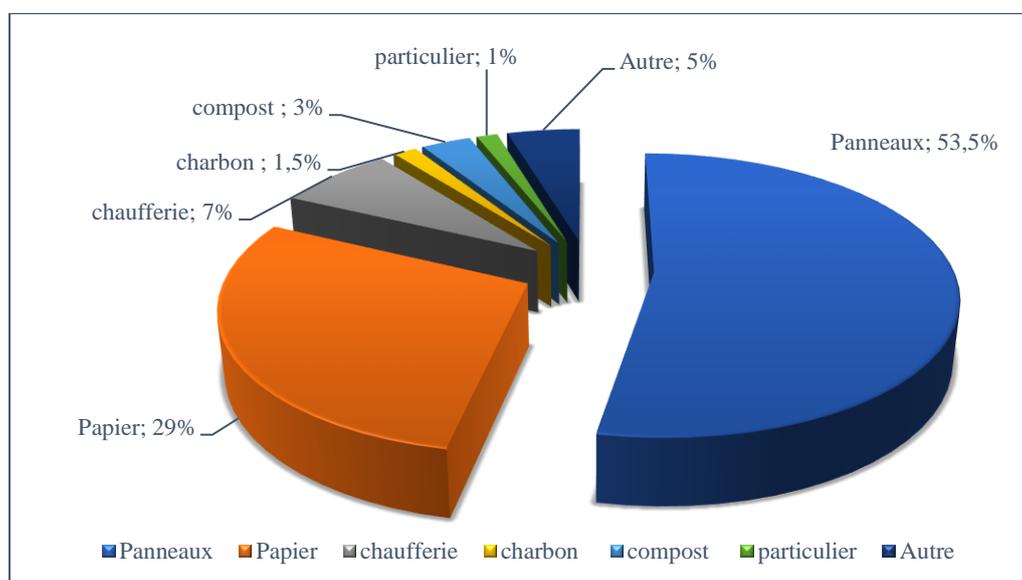


Figure 2 : Répartition des utilisations des connexes et sous-produits de la première transformation du bois en Lorraine, réalisé à partir des données de [10].

Les résidus issus de la seconde transformation du bois sont considérés comme des déchets car ils peuvent contenir des adjuvants ou des traitements. Ils sont alors soumis aux mêmes règles que les produits bois en fin de vie.

Les produits bois en fin de vie représentent les produits fabriqués en bois qui ne peuvent pas être recyclés. Ces combustibles sont considérés selon les différentes rubriques des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) : combustible bois énergie, déchets non dangereux ou déchets dangereux. Ces produits sont destinés à des installations (chaudières collectives, chaudières industrielles, installations d'incinération, etc.) qui respectent les prescriptions imposées dans le cadre des ICPE [11].

1.1.2. Anatomie du bois

Les caractéristiques anisotropes et hétérogènes du bois proviennent de sa structure anatomique particulière. Le bois est un ensemble complexe de cellules végétales permettant à l'arbre le transport de la sève, lui confortant sa tenue mécanique et le stockage des réserves nécessaires à sa croissance.

Deux grands groupes représentent l'ensemble des essences de bois. Le plus ancien, les résineux ou conifères, est apparu il y a environ 270 millions d'années et fait partie des gymnospermes. C'est un bois avec une structure simple composé à 90% en volume de trachéides longitudinales, ces cellules assurent les rôles de transport de la sève et de maintien mécanique. Le deuxième groupe apparu il y a environ 100 millions d'années sont les feuillus, des végétaux ligneux de la classe des dicotylédones parmi les angiospermes. Leur structure est plus complexe avec des cellules spécialisées, la circulation de la sève est réalisée par des vaisseaux et le maintien mécanique par les fibres. Dans les deux cas ces cellules sont mortes, seules les cellules de parenchyme sont vivantes et présentes dans les deux groupes. Ces dernières assurent le rôle de stockage, souvent de l'amidon, réserve d'énergie pour la croissance du bois.

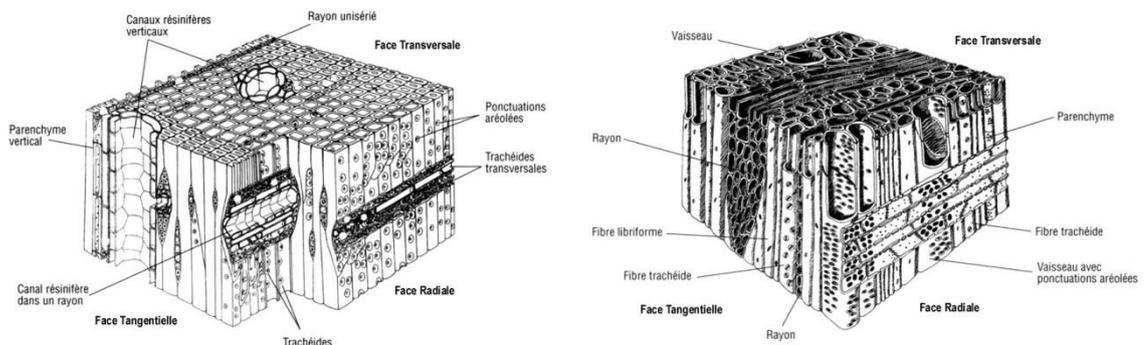


Figure 3 : Élément du plan ligneux des bois de résineux (gauche) et feuillus (droite).

Les propriétés du bois viennent en majorité de la structure de la paroi cellulaire. Cette paroi a une composition similaire entre les différentes essences et même les différents groupes. Elle est composée de trois sous-ensembles [12][13], cf. Figure 4.

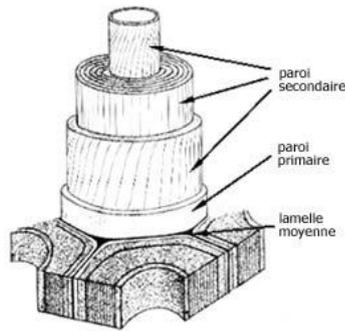


Figure 4 : Schéma de la paroi cellulaire et ses différentes couches.

- La couche intercellulaire, formée lors de la division cellulaire dans le cambium ;
- La paroi primaire, constituée de micro-fibrilles de cellulose enchevêtrée ;
- La paroi secondaire, composée de trois sous couches ayant un réseau de micro-fibrilles de cellulose organisée selon un angle d'enroulement donné.

1.1.3. Composition chimique du bois

Le bois est un matériau composite contenant trois grandes familles de composés :

- La cellulose ;
- Les hémicelluloses ;
- La lignine.

A ces trois familles s'ajoutent tous les extractibles organiques et inorganiques.

La composition de ces différents composés varie en fonction de l'essence, de la zone géographique et du milieu de culture. Le Tableau 1 présente les données moyennes de composition chimique des résineux et feuillus de zone tempérée [14].

Tableau 1 : Composition chimique moyenne de bois de résineux et de feuillus de zone tempérée.

	Cellulose	Lignine	Hémicelluloses	Extractibles
Résineux	42,2 ± 2	28 ± 3	27 ± 2	3 ± 2
Feuillus	45 ± 2	20 ± 4	30 ± 5	5 ± 2

1.1.3.1. La cellulose

La cellulose est la substance la plus abondante dans la nature. Elle a été découverte par un scientifique français du nom d'Anselme Payen¹ en 1839 [15,16]. La cellulose du bois est principalement utilisée dans la fabrication du papier. C'est un homopolysaccharide linéaire d'anhydroglucose en β -(1,4), comme montré sur la Figure 5, son degré de polymérisation moyen est de l'ordre de 5000 dans le bois. La cellulose se trouve sous forme de microfibrilles avec des zones organisées dites zones cristallisées, les chaînes de polysaccharides sont liées sur un même plan par des liaisons hydrogènes et les différents plans par des liaisons faibles de Van der Waals.

¹ Un prix portant son nom récompense chaque année un chercheur pour ses travaux sur la cellulose. Il existe depuis 1962.

Les zones sans organisation sont dites amorphes. La cellulose du fait de sa nature fibreuse apporte à l'arbre une grande résistance à la flexion. [13,17–20]

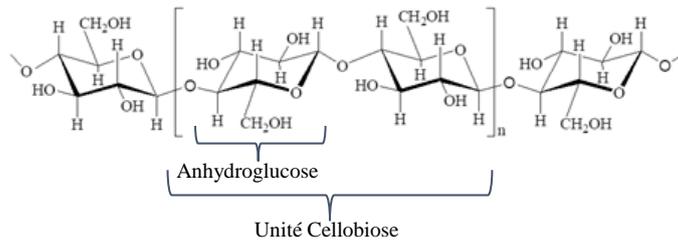


Figure 5 : Structure chimique de la cellulose.

1.1.3.2. Les hémicelluloses

Les hémicelluloses sont des polyosides structuraux, elles sont le liant entre les lignines et la cellulose. Ce sont des polysaccharides ramifiés qui peuvent être soit des homopolymères, soit des hétéropolymères (plus fréquent) de degré de polymérisation de l'ordre de 150. Les principales familles d'hémicelluloses que l'on retrouve dans la nature sont les xylanes, les mannanes et les galactanes. Les résineux contiennent majoritairement des mannanes et les feuillus des xylanes. La Figure 6 présente quelques hémicelluloses du bois. [13,17,18,20]

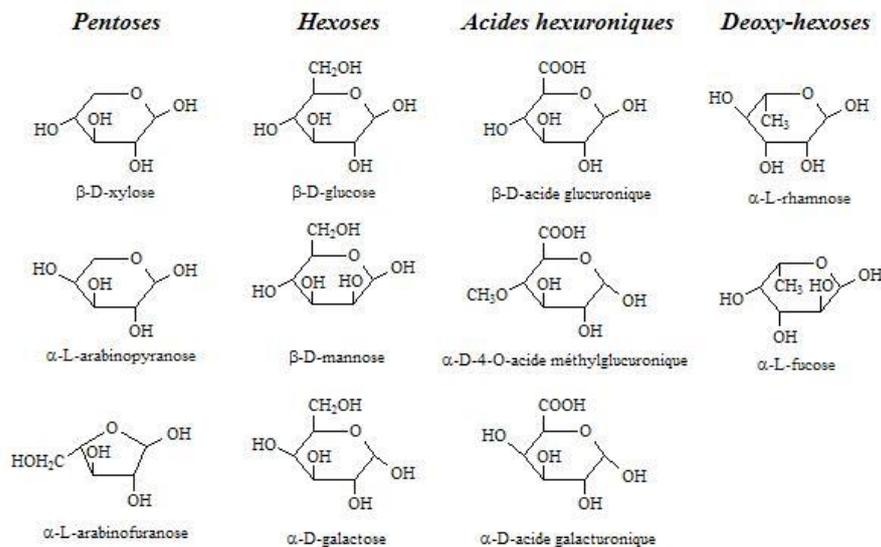


Figure 6 : Principales hémicelluloses présentes dans le bois.

1.1.3.3. Les lignines

Les lignines sont des macromolécules complexes, ce sont des polymères polyphénoliques ramifiés formant un réseau tridimensionnel. Les trois phénylpropanes de base ou monolignols à l'origine des lignines sont l'alcool coniférylique, l'alcool sinapylique et l'alcool coumarylique (Figure 7). Il y a beaucoup de variation structurelle des lignines entre les différentes espèces végétales et en fonction du lieu et de la méthode de prélèvement. Il est donc difficile de préciser une structure particulière.

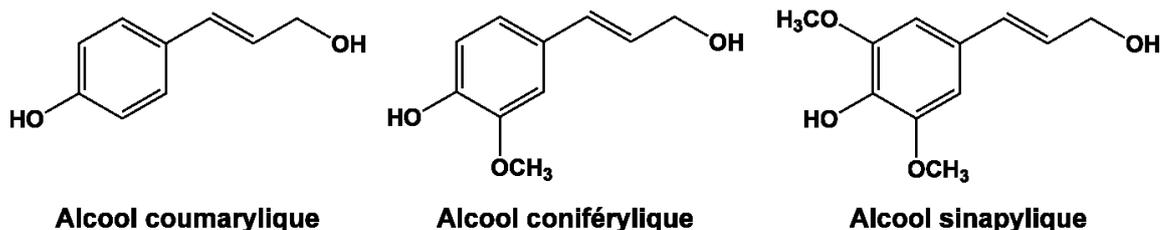


Figure 7 : Les trois phénylpropanes précurseurs de la lignine.

Les lignines sont un constituant caractéristique des plantes vasculaires. Elles ont une grande importance dans la constitution des parois des vaisseaux conducteurs de la sève, leurs hydrophobies et leurs grandes résistances en assurent l'imperméabilité. Les lignines apportent la rigidité des parois cellulaires et permettent aux plantes lignocellulosiques de croître en hauteur. [17,18,20]

1.1.3.4. Les extractibles

Les extractibles sont des composés ne prenant pas part à la structure du bois, ils sont généralement extractibles par des solvants organiques ou de l'eau. Les composés inorganiques (minéraux) sont parfois intégrés dans cette partie ou bien classés dans les cendres car ils peuvent être extraits dans l'eau et étudiés dans les cendres. Les principaux extractibles organiques sont les polyphénols, les terpénoïdes, les cires, les graisses, des sels d'acides organiques, des glucides et des composés azotés.

Les extractibles représentent moins de 5% de la masse anhydre du bois, pourtant ils ont une grande importance. Ils confèrent une résistance naturelle aux insectes et champignons, ils sont responsables de la couleur et de l'odeur du bois, et de plus les propriétés acoustique, d'imprégnabilité, et d'inflammabilité sont liées aux extractibles. Ces propriétés en font des composés très intéressants du point de vue de l'industrie pharmaceutique [17,21,22].

1.1.4. Propriétés liées principalement à l'énergie

Le bois comme combustible est caractérisé par son pouvoir calorifique, sa granulométrie, son taux d'humidité, et son taux de cendres. La composition élémentaire peut être ajoutée à titre informatif mais elle est importante lors de l'étude de la combustion. La norme NF EN ISO 17225-1 : 2014 présente les exigences générales pour les biocombustibles solides.

1.1.4.1. Granulométrie ou dimension du combustible

La granulométrie ou la dimension du combustible est un paramètre essentiel dans la gestion des appareils de production d'énergie. Ce paramètre va permettre de faire un choix dans le type de chargement du combustible. Il permet le choix du type d'installation à concevoir et donc la technologie à utiliser. Le bois est un combustible produisant du charbon, l'épaisseur de la couche de charbon qui se forme autour du bois, lors de sa dégradation thermique, limite le transfert de chaleur dans le combustible [23]. La granulométrie a donc aussi un fort impact sur la qualité du combustible, et plus particulièrement sur la cinétique de combustion.

Le terme de granulométrie est essentiellement utilisé pour les combustibles bois broyé non densifié, la mesure est effectuée en suivant la norme NF EN ISO 17827-1 : 2016.

Le terme de taille de combustible concerne plus le bois bûche et les briquettes pour lesquels les paramètres pris en compte sont la longueur et le diamètre, il en va de même pour les granulés qui possèdent leurs propres réglementations (NF EN ISO 17829 : 2016).

1.1.4.2. Humidité

Le bois est un matériau hygroscopique donc l'humidité varie en fonction du milieu où il se trouve. Les variations d'humidité affectent grandement ses propriétés physiques ce qui pose des problèmes lors de son utilisation en tant que matériau. L'humidité affecte aussi ses propriétés physiques et la quantité d'énergie maximale qu'il est capable de libérer lors de sa combustion.

Il y a deux façons d'exprimer la quantité d'humidité contenue dans le bois, l'humidité sur brut (H_b) et l'humidité sur sec (H_s). La première considère le pourcentage d'eau contenue dans le bois humide :

$$H_b = 100 * \frac{m_{humide} - m_{sec}}{m_{humide}} \quad (1)$$

Avec :

H_b : L'humidité sur brute (%);

m_{humide} : La masse de bois humide (g);

m_{sec} : La masse du bois sec (g).

Et la seconde, la quantité d'eau est comparée à la quantité de bois sec :

$$H_s = 100 * \frac{m_{humide} - m_{sec}}{m_{sec}} \quad (2)$$

Avec :

H_s : l'humidité sur masse sèche (%).

Dans le secteur de l'énergie, il est courant d'utiliser l'humidité sur brut, et il a été choisi de ne parler que d'humidité sur brut dans ce manuscrit. Un bois vert aura une humidité pouvant aller jusqu'à 75%, puis son humidité s'équilibre en fonction du milieu où il est entreposé. Pour les biocombustibles solides les normes NF EN ISO 18134 (1, 2, 3) décrivent les méthodes de séchage.

1.1.4.3. Taux de cendres

Le taux de cendres permet de déterminer la quantité de minéraux contenue dans le bois. La mesure de cette grandeur a beaucoup d'importance dans le cas d'une utilisation du bois en tant que combustible, notamment pour adapter les systèmes d'évacuation des cendres, mais aussi pour estimer la possible formation de mâchefers (cendres fondues et mêlées à des particules d'imbrûlés) qui peuvent perturber le fonctionnement des appareils (bouchage des arrivées d'air, obstacles pour les pièces en mouvement dans le cas des chaudières industrielles, ...)

Ce taux se situe dans les bois sans écorces des régions tempérées en moyenne à moins de 1% et l'écorce contient entre 3% et 7%. Le taux de minéraux dépend singulièrement de la zone de production et aussi de la méthode de prélèvement et de stockage qui, par contact avec des éléments extérieurs viendrait polluer le bois (terre, sable, etc...). Les bois tropicaux ont souvent un taux de cendres plus important, certaines essences pouvant atteindre une teneur supérieure à 5%. Les cendres sont composées en majorité de calcium, potassium, silicium et magnésium à quoi s'ajoute un certain nombre d'éléments (Na, P, Mn, Fe, Al, Cu, Zn). [24–27]. La composition des cendres est aussi une information importante dans le domaine de l'énergie. Les métaux alcalins et alcalino-terreux (K, Na, Ca, Mg), plus particulièrement le potassium, en présence de silicates abaissent la température de fusion (~800°C). Ceci a une incidence directe sur l'encrassement des échangeurs, surtout lorsqu'ils sont à courants croisés car le dépôt se fait majoritairement par impact [28–30]. Le chlore augmente les risques de corrosion des métaux, et en mélange avec des métaux alcalins (KCl, NaCl) la corrosion des aciers réfractaires et des alliages de Nickel est facilitée [31–34].

La mesure de la teneur en cendres est effectuée en suivant la norme NF EN ISO 18122 (2015/12/25). Elle est réalisée après séchage et pesage de l'échantillon en effectuant une première étape de montée en température sur une période entre 30 min et 50 min pour atteindre 250°C, puis maintien à 250°C pendant 1h pour évacuer les matières volatiles. La température est ensuite progressivement augmentée (10°C/min) jusqu'à 550°C pour l'étape de combustion qui durera au moins 2h. L'échantillon est ensuite pesé, tout en faisant attention à garder les cendres sèches car elles sont très hygroscopiques, le résultat est la comparaison de la masse de cendres sur la masse de bois sec :

$$A_d = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100 * \frac{100}{100 - H_b} \quad (3)$$

Avec :

m_1 : La masse du creuset vide ;

m_2 : La masse du creuset contenant l'échantillon ;

m_3 : La masse du creuset contenant les cendres ;

H_b : L'humidité sur brute de l'échantillon.

Il existe une deuxième méthode de mesure du taux de cendres, cette technique demande une température de 815°C. Cette méthode permet la décomposition du carbonate de calcium, CaCO₃, pour obtenir l'oxyde de calcium, CaO, la température de dissociation varie entre 780°C et 860°C en fonction du ratio K/Ca. Cette méthode permet donc d'obtenir un taux de cendres avec calcination complète des cendres. A ce niveau de température le potassium peut se volatiliser, et donc fausser le bilan global [35]. Le calcaire et le potassium sont deux des composés principaux des cendres du bois, il est donc préférable d'utiliser la méthode du taux de cendres à 550°C pour le bois. Généralement, la méthode à 550°C est utilisée pour les bûches et la combustion à usage domestique car les niveaux de température atteints sont du même ordre. Dans l'industrie et la production de chaleur pour le tertiaire, l'utilisation de la méthode à 815°C est préférée car plus représentative des niveaux de températures atteints.

1.1.4.4. Composition chimique élémentaire

La composition chimique élémentaire du bois est importante pour la combustion car elle va permettre d'écrire l'équation de combustion du solide et d'estimer la production potentielle de polluants, notamment d'oxydes d'azote et de soufre, mais aussi de produits acides (acide chlorhydrique et fluorhydrique) ou de dioxines et furannes. L'analyse de la composition élémentaire permet classiquement d'obtenir les teneurs en carbone, hydrogène, oxygène, azote et soufre. D'autres composés comme le chlore, le fluor, les minéraux et les métaux peuvent être aussi quantifiés. La norme NF EN ISO 16948 d'août 2015 propose une méthode normalisée pour la détermination des teneurs en carbone, hydrogène et azote provenant d'un combustible solide. La norme NF EN ISO 16994 du 21/10/2016 décrit quant à elle la méthode de détermination de la teneur totale en soufre et en chlore du biocombustible solide. Finalement, la norme NF EN ISO 16967 de mai 2015 donne une méthode de détermination des éléments majeurs Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na, Ti.

Le tableau suivant réunit des valeurs moyennes de compositions chimiques élémentaires en masse pour des résineux et des feuillus [24] et la composition élémentaire du bois utilisé de manière générale [36], ces données représentent uniquement la partie organique (bois sec sans minéraux). Le bois contient moins de 1% d'azote et moins de 0,1% de soufre. Le bois ne contient naturellement pas de chlore et n'est donc pas sujet à la production de dioxines et furanes. Néanmoins, selon le mode de collecte et l'historique du bois entre la forêt et le foyer de combustion, des polluants (terre, gravats et autres) peuvent s'ajouter et rendre la teneur en chlore non nulle. C'est pourquoi, par exemple, la combustion des déchets bois pouvant contenir des plastiques (PVC notamment) n'est autorisée que dans des incinérateurs dotés de systèmes d'élimination des dioxines.

Tableau 2 : Composition chimique élémentaires du bois sec sans minéraux (dry ash free, daf).

Elément	Moyenne des feuillus (%)	Moyenne des résineux (%)	Moyenne du bois (%)
C	50,2	52,7	50
H	6,2	6,3	6
O	43,5	40,8	44
N	0,1	0,2	-
S	-	-	-

De la composition chimique élémentaire moyenne une formule brute du bois est extraite : $CH_{1,44}O_{0,66}$ [27,36]

1.1.4.5. Pouvoir Calorifique

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) représente la quantité maximale d'énergie délivrée par 1kg de combustible lors d'une combustion complète. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est le résultat d'une combustion complète avec vaporisation de l'eau, il y a perte de l'énergie de vaporisation de l'eau. Généralement, le PCS est mesuré et le PCI est déduit du PCS en prenant en compte la vaporisation de l'eau.

Deux PCI peuvent alors être pris en compte : lorsque le bois est sec (PCI_s) et lorsque le bois est humide (PCI_h). Dans le premier cas, l'eau provient uniquement de la combustion de l'hydrogène

compris dans la composition élémentaire du bois. Dans le deuxième cas, vient s'ajouter l'eau présente directement sous forme d'humidité du bois :

$$PCI_s = PCS - L_v \times \left(\frac{M_{H_2O}}{2M_H} \right) \times \frac{H}{100} \quad (4)$$

$$PCI_h = PCS \times \frac{100 - H_b}{100} - L_v \times \frac{\left(\frac{M_{H_2O}}{2M_H} \right) \times H + H_b}{100} \quad (5)$$

Avec :

L_v : L'enthalpie de vaporisation de l'eau (2250 kJ/kg) ;

M_{H_2O} : La masse molaire de l'eau (18 g/mol) ;

M_H : La masse molaire de l'hydrogène (1 g/mol) ;

H : Le pourcentage d'hydrogène dans le combustible (%) ;

H_b : L'humidité sur brute du combustible.

Il en résulte que le pouvoir calorifique du bois est grandement affecté par son humidité. La Figure 8 représente cette évolution pour les résineux et les feuillus.

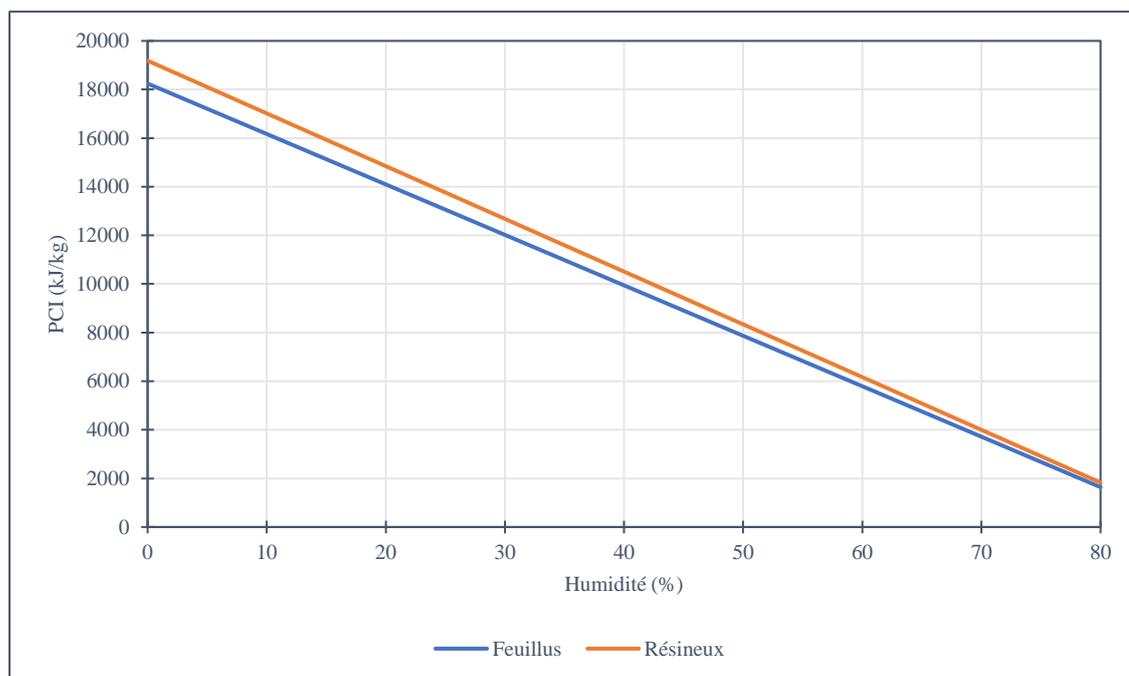


Figure 8 : Variation du PCI moyen des feuillus et des résineux en fonction de l'humidité.

La mesure du pouvoir calorifique se fait en bombe calorimétrique, la norme NF EN ISO 18125 (2017/07/07) présente la méthode à utiliser. Les valeurs du PCI sec varient en fonction des essences. Chez les feuillus, il varie entre 16700 et 18000kJ/kg et chez les résineux entre 17600 et 19600kJ/kg [27].

La valeur pouvoir calorifique peut être approchée par calcul, mais ce qui est juste c'est la mesure. L'ADEME propose en 2002 plusieurs formules basées sur la composition élémentaire du matériau, formule de Dulong datant de 1880 pour le charbon et ses dérivés, et une formule utilisant

des données d'analyse approximative [37]. La formule de Vandralek donne de bons résultats pour le bois :

$$PCS = 4,18 * (85C_{\%} + 270H_{\%} + 26 \times (S_{\%} - O_{\%})) \quad [kJ/kg] \quad (6)$$

Avec :

$C_{\%}$: Pourcentage de carbone dans le combustible ;

$H_{\%}$: Pourcentage d'hydrogène dans le combustible ;

$S_{\%}$: Pourcentage de Soufre dans le combustible ;

$O_{\%}$: Pourcentage d'oxygène dans le combustible.

Il existe un grand nombre de relations pour obtenir le PCS de combustibles solide, liquide et gazeux [38]. Certaines formules sont plus spécialisées pour la biomasse [39–42].

1.2. Les différentes formes de combustible de bois

Le bois se trouve sous plusieurs formes lorsqu'il est utilisé comme combustible. Les formes décrites sont les plus répandues pour le chauffage domestique ciblé par le micro-cogénérateur. Seuls les produits élaborés et le bois bûche sont présentés, les produits bruts (produits connexes de scierie), n'étant pas couramment utilisés directement par le particulier, ne seront pas présentés.

Les produits sélectionnés sont décrits et comparés afin de montrer les avantages et inconvénients des granulés de bois vis-à-vis des autres combustibles. Les principaux combustibles bois utilisés dans le chauffage domestique sont :

- Le bois bûches ;
- Les plaquettes de bois ;
- Les briquettes ;
- Les granulés de bois.

Chacune de ces familles de combustible possède ses propres caractéristiques, elles sont présentées dans la suite puis une comparaison avec les granulés est réalisée. Les prix de vente des combustibles sont récupérés sur le site de la Fédération Nationale du Bois (FNB), ils sont publiés tous les trimestres. C'est le centre d'études de l'économie du bois (CEEB) qui les publie en partenariat avec l'institut national de la statistique et des études économiques (Insee) et du ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt. [43]

1.2.1. Le bois bûches

Le bois sous forme de bûches est le biocombustible le plus répandu en France. Il y a différentes façons de se fournir en bois bûches. Le bois bûches est un chauffage de proximité, il est nécessaire d'être proche de la ressource (moins de 50km). La vente de bois bûches ne possède pas de code d'activité spécifique et elle est rarement l'activité principale de la société.

Les propriétaires forestiers font de l'autoconsommation, ils sont au plus proche de la ressource et la fabrication de bois de chauffage est peu onéreuse. Le voisinage peut acheter des lots déjà

préparés ou se les voir offrir en échange de services. Le bois peut aussi être vendu sur pied, c'est alors à l'acheteur de le façonner.[44]

Les forêts communales ont l'obligation d'être gérées par l'Office National des Forêts (ONF), pourtant elles bénéficient d'un droit ancestral, datant du moyen âge, permettant aux communes d'exploiter eux-mêmes leur forêt grâce à « l'affouage ». Ceci leur permet de proposer aux habitants qui en font la demande un volume de bois sur pied qu'ils façonneront eux-mêmes. La revente de bois d'affouage est interdite et les arbres à abattre sont marqués par l'ONF [45]. Dans les forêts où l'ONF s'occupe de la commercialisation, les bois sur pied sont vendus à des professionnels qui vont ensuite les exploiter.

Il existe différentes longueurs de bûches ; 25cm, 33cm, 40cm, 50cm et 1m. Les plus couramment utilisés sont les bûches de taille 33cm et 50cm. Les essences privilégiées sont : le chêne, le charme, l'orme, le hêtre, le frêne et l'érable. Tous sont des feuillus, ils sont choisis pour leur densité plus importante que celle des résineux. Les données de classes et spécifications du combustible sont rassemblées dans la norme NF EN ISO 17225-5 :2014 et les données permettant d'assurer la qualité du combustible dans la norme NF ISO 15234-5 :2012.

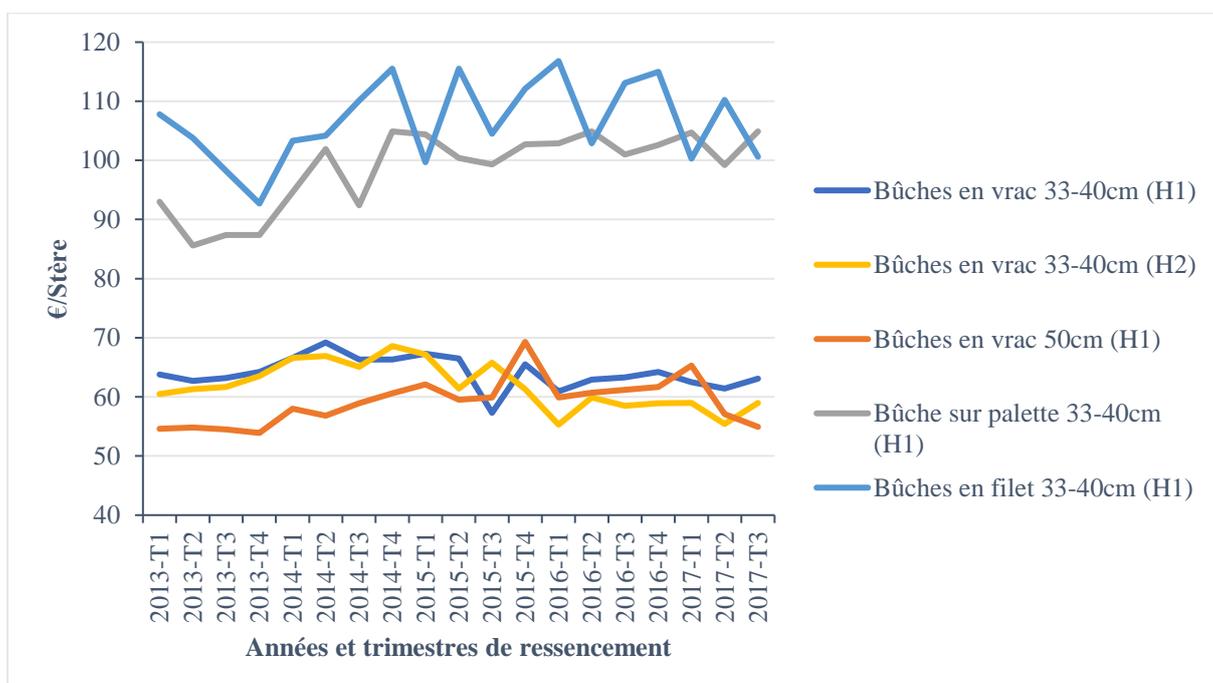


Figure 9 : Variation du prix d'une sélection de bûches de bois depuis Janvier 2013 réalisé avec les données de [43].

La Figure 9 montre la variation des tarifs de vente des bûches depuis 2013. Les prix sont donnés en €/Stère, le stère est une unité de mesure utilisée pour les bûches de bois. Il correspond à un empilement d'un volume de 1 m³ pour des bûches de 1m de long. Dans le graphique, H1 correspond à une humidité inférieure à 30% et H2 une humidité comprise entre 30% et 40%. Le prix des bûches est plutôt stable dans le temps, il varie faiblement en fonction de leur longueur, le stère de bûche de 50 cm est en moyenne moins cher de 8% que des bûches de 33 à 40cm. L'humidité a elle aussi un faible impact sur le prix avec 3% d'écart entre H1 et H2 pour les bûches de 33 à 40 cm. Cependant l'emballage joue un rôle important sur le prix, 54% et 66% d'augmentation pour respectivement les

bûches sur palette et les bûches en filet par rapport au vrac. Selon l'ADEME, le prix au kWh en 2015 des bûches variées entre 3,4 c€/kWh et 4,2 c€/kWh, ce qui en fait une des énergies les moins chères. [46]

Les bûches de bois demandent un grand espace de stockage et doivent être séchées avant leur utilisation dans un appareil de chauffage afin de profiter pleinement de leur énergie. De plus, de la manutention est à prévoir pour transporter les bûches vers le foyer et même pour alimenter celui-ci.

1.2.2. Les plaquettes de bois

Il existe différents types de plaquettes de bois, elles sont classées en fonction de leurs origines. Dans le domaine du chauffage domestique la plaquette n'est pas très présente. Ce combustible est plus destiné au chauffage collectif et industriel. Dans le cadre du chauffage domestique, seules les plaquettes de petites granulométries et de faible humidité sont envisageables. Les deux origines pouvant correspondre sont les plaquettes forestières et les plaquettes de scierie. La qualité du combustible sera aussi jugée avec son taux de cendres, l'absence d'écorce favorisant une faible teneur. Les détails des exigences normatives pour qualifier le combustible et assurer la qualité du combustible sont respectivement dans les normes NF EN ISO 17225-4 :2014 et NF EN 15234-4 :2012.

Ce combustible est souvent utilisé par les agriculteurs mais aussi par les consommateurs vivants à proximité des zones de production. La production des plaquettes demande un broyeur, une zone de séchage et un calibreuse afin de trier les plaquettes en fonction de leur utilisation finale. Les plaquettes sont soit réalisées avec des résidus de coupe en forêt soit avec des produits connexes de scierie. Le consommateur a besoin obligatoirement d'un espace de stockage (silo) important, en comparaison 1T de bois de feuillu dense et sec demandera un volume apparent de 2,1 m³ de bûches empilées de 50 cm contre 3,8 m³ de volume apparent de plaquettes. Les appareils de chauffage fonctionnant aux plaquettes sont généralement les plus chers de l'ensemble des dispositifs de stockage et de convoyage.

En revanche, les plaquettes permettent un fonctionnement totalement automatique, ce qui crée un confort d'utilisation intéressant. De plus leur prix est attractif du fait de l'utilisation de sous-produits, d'un investissement faible de la part du producteur et de la proximité de la ressource [47].

1.2.3. Les briquettes ou bûchettes densifiées

Les briquettes ou bûchettes densifiées sont un combustible peu courant qui vient en substitution de la bûche. Elles sont surtout fabriquées à partir de bois de résineux. Le bois est décheté puis compacté dans un moule ou dans une extrudeuse de gros diamètre. Elles ont l'avantage de posséder une faible humidité et une forte densité. Elles peuvent donc être transportées et être utilisées dans des zones plus éloignées que les lieux de production. Mais elles sont sensibles à l'humidité et peuvent se délier avec le temps et les manipulations. Les détails des exigences normatives pour qualifier le combustible et assurer la qualité sont respectivement dans les normes NF EN ISO 17225-3 :2014 et NF EN 15234-3 :2012.

La bûchette densifiée est le combustible le plus cher avec un tarif de 7,7c€/kWh, soit le double du prix relevé pour les bûches de 50cm [48]. C'est un produit aux dimensions homogènes et qui demande moins de stockage. Il est principalement utilisé en boulangerie et pizzeria.

1.2.4. Les granulés de bois

Les granulés de bois sont aussi appelés pellets qui est sa dénomination anglaise. Ce sont des particules cylindriques de bois comprimé. Les granulés sont produits de façon industrielle, le procédé de fabrication est décrit dans un premier temps. Les caractéristiques des granulés comme combustible sont ensuite décrites plus en détails. Enfin un comparatif entre les différents combustibles est réalisé. La Figure 10 montre un amas de granulés.



Figure 10 : Amas de granulés.

1.2.4.1. Fabrication des granulés de bois

La production des granulés est industrielle, c'est un procédé demandant un investissement important, mais qui produit de fortes quantités. La chaîne de production industrielle suit le principe indiqué sur le schéma Figure 11.

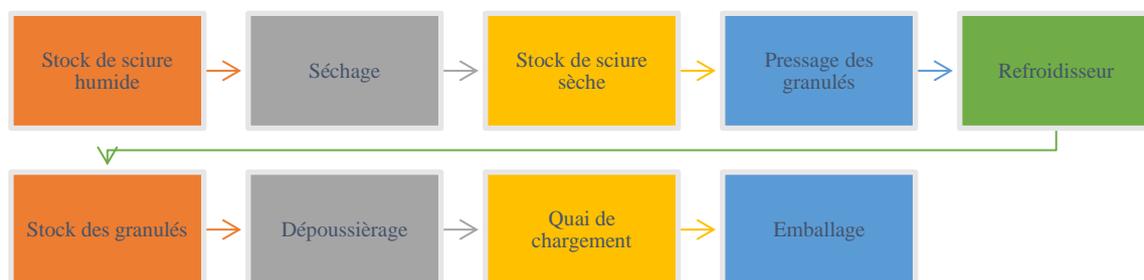


Figure 11 : Principe de fonctionnement d'une usine de production de granulés.

Les granulés sont fabriqués principalement à partir de sciures issues directement de scieries. Il existe quelques rares cas de production à partir de grumes ou de plaquettes, qui sont alors broyées pour fabriquer de la sciure qui entre ensuite dans le procédé décrit précédemment.

La sciure humide, provenant directement de scieries ou issue de broyage fin, est transportée jusqu'à l'entrée du séchoir. Les technologies de séchoir sont diverses, les deux principales étaient les séchoirs à tambour et séchoirs à bandes, les séchoirs tambour étant plus adaptés pour des débits importants et les séchoirs à bande plus simple d'utilisation.

Les sciures sèches sont stockées dans des silos renforcés en béton possédant des sécurités contre les explosions. En effet, la sciure peut se retrouver dans les conditions idéales d'une explosion en étant en suspension dans un milieu fermé contenant de l'oxygène, et en présence d'une source potentielle d'allumage [49]. Le silo sera découplé du reste de l'usine afin de réduire au maximum les risques matériels et humains.

La sciure est ensuite compressée dans une presse à granulés, l'humidité de la sciure entrante étant contrôlée aux environ de 10%. La sciure est pressée contre une filière, l'échauffement du matériau permet à la lignine d'entrer en phase de transition vitreuse et de servir de liant. Sur certains sites et en fonction de la qualité des combustibles, des additifs biosourcés (amidon) sont ajoutés pour améliorer la qualité des granulés [50]. En sortie de filière les granulés ont un aspect brillant sur l'extérieur, c'est le résultat de la plastification de la lignine. La longueur est gérée en sortie de filière par des couteaux qui viennent casser le granulé. La taille des orifices de la filière varie entre 6 mm et 8 mm pour les usages dans le chauffage domestique. Après refroidissement, les granulés sont criblés, puis stockés dans un silo.[21,47]

Les granulés peuvent être vendus en vrac du producteur vers le distributeur ou directement au consommateur. Ils peuvent aussi être conditionnés dans des big-bags ou par sacs de 15kg. Le consommateur peut aussi être directement livré chez lui par camion-citerne, les granulés sont alors soufflés dans un silo de stockage.

1.2.4.2. Caractéristiques des granulés comme combustible

Le tableau 1 de la norme NF EN ISO 17225-2 : 2014 donne les spécifications de classes de granulés de bois pour un usage non industriel. Le Tableau 3 reproduit les recommandations de la norme pour les granulés à destination du marché du chauffage domestique.

Tableau 3 : Données de spécification de la classe A1 selon NF EN ISO 17225-2 :2014.

Classes de propriété	Méthode d'analyse	Recommandations
Origine et source	ISO 17225-1	1.1.3 Grumes 1.2.1 Sous-produits du bois non traités chimiquement
Diamètre(D) et Longueur (L)	ISO 17829	D06, 6 ± 1 mm ; D08, 8 ± 1mm ; 3,15mm < L ≤ 40mm
Humidité (M)	ISO 18134-1 ISO 18134-2	M10 ≤ 10 % sur masse humide (Hb)
Cendres (A)	ISO 18122	A0.7 ≤ 0,7 % sur masse sèche
Résistance mécanique (DU)	ISO 17831-1	DU97.5 ≥ 97,5 % en masse, à réception
Fines (F)	ISO 18846	F1.0 ≤ 1,0 % en masse, à réception
Additifs		≤ 2 % en masse, à réception Type et quantité à mentionner
Pouvoir calorifique inférieur (Q)	ISO 18125	Q16.5 ≥ 16,5 MJ/kg ; Q4.6 ≥ 4,6kWh/kg
Masse volumique apparente (BD)	ISO 17828	BD600 ≥ 600 kg/m ³ ; à réception
Azote, N	ISO 16948	N0.3 ≤ 0,3 % sur masse sèche
Soufre, S	ISO 16994	S0.04 ≤ 0,04 % sur masse sèche
Chlore, Cl		Cl0.02 ≤ 0,02 % sur masse sèche
Arsenic, As	ISO 16968	≤ 1 mg/kg anhydre
Cadmium, Cd		≤ 0,5 mg/kg anhydre
Chrome, Cr		≤ 10 mg/kg anhydre
Cuivre, Cu		≤ 10 mg/kg anhydre
Plomb, Pb		≤ 10 mg/kg anhydre
Mercure, Hg		≤ 0,1 mg/kg anhydre
Nickel, Ni		≤ 10 mg/kg anhydre
Zinc, Zn		≤ 100 mg/kg anhydre
Comportement de fusibilité des cendres	CEN/TS 15370-1	À mentionner (°C)

Une norme ne possède pas de caractère obligatoire, c'est un document de référence. Elle est écrite en collaboration avec les acteurs du domaine concerné. Le suivi d'une norme se fait sur la base du volontariat. Cependant, sur le marché, le respect de la norme est un critère de vente très important. Des organismes indépendants permettent de délivrer diverses certifications pour assurer le client du bon respect des conditions imposées dans la norme et donc la qualité du granulé [51]. Dans le cas des granulés de bois le référentiel est la norme NF EN ISO 17225-2 : 2014, et il existe plusieurs organismes certificateurs du bon suivi de cette dernière.



Figure 12 : Logos de différents certificats pour les granulés de bois.

Plusieurs certifications existent au niveau européen et délivrent des labels reconnus auprès des fabricants d'appareils. L'institut technologique FCBA (Forêt Cellulose Bois construction Ameublement) délivre la certification française NF Biocombustibles solides (AFNOR) [52]. La certification « *DIN plus* » est délivrée par DIN CERTO, un organisme fondé en 1972 par l'Institut Allemand de Normalisation (DIN) [53]. Enfin l'Union Européenne par l'intermédiaire de l'organisme PROPELLET France propose la certification « *ENplus* ». Cette dernière certification se base en plus sur la norme ISO 9001 et EN 15234-2 pour la gestion de la qualité lors de la production et la manutention de granulés de bois [54]. Les logos de chacune de ces certifications sont regroupés dans la Figure 12.

1.2.4.3. Comparaison des différents combustibles bois

Une comparaison sur les tarifs de vente des différents combustibles est réalisée, avec l'ajout des combustibles fossiles non-renouvelables. Les différents combustibles ont chacun leurs avantages et inconvénients, rappelons que pour le projet il faut pouvoir atteindre une haute température (1200°C) stabilisée durant le temps de fonctionnement de l'appareil. Un tableau récapitulatif comparera de manière qualitative les avantages et inconvénients des différents combustibles bois en fonction de différents critères.

a) Comparaison des tarifs

Dans la Figure 13, les prix d'achat des différents combustibles bois pour la production d'énergie sont comparés, l'ensemble des tarifs correspondent à un usage domestique.

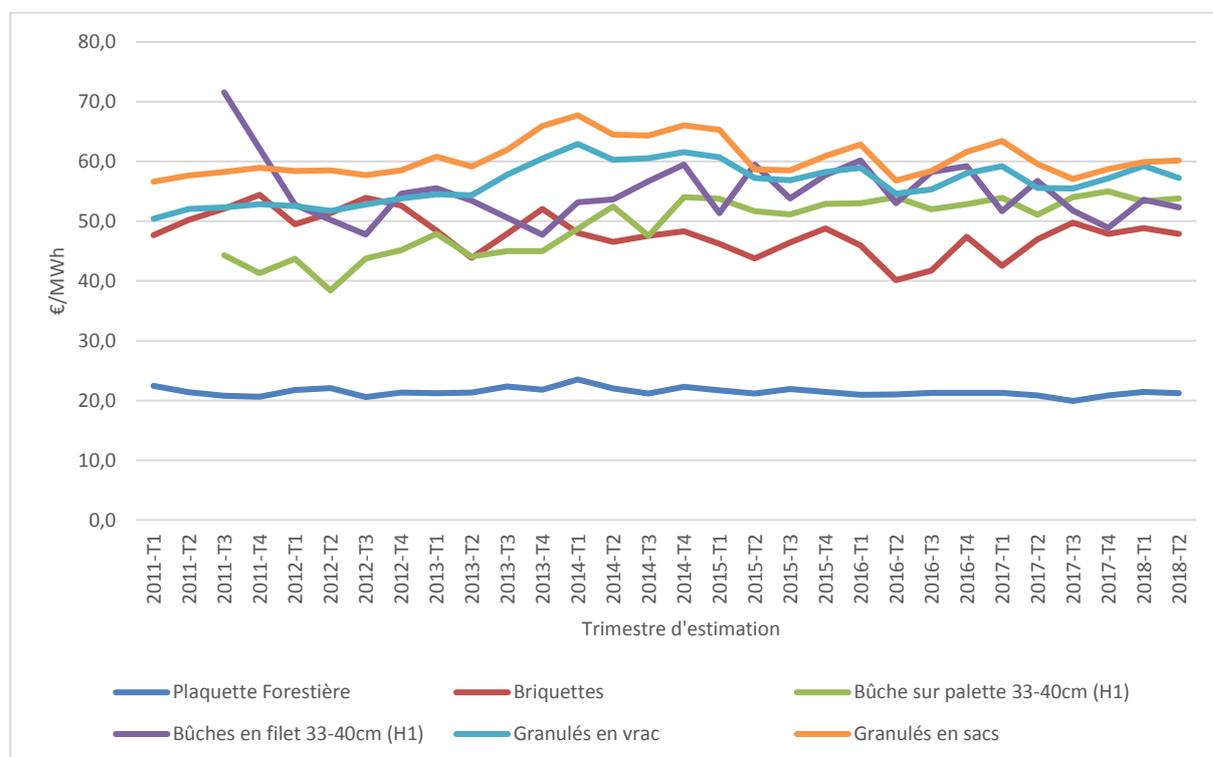


Figure 13 : Comparaison du tarif des différentes énergies en €/MWh, données : [43,55].

La Figure 13 montre le grand déséquilibre existant entre les différents combustibles bois. Les combustibles qui ont été transformés (granulés et briquettes) sont naturellement les plus chers, mais le bois bûche en filet est au même niveau car il doit être transporté jusqu'aux distributeurs. Ce tarif révèle l'intérêt des bûchettes densifiées en remplacement des bûches dans les zones éloignées des fournisseurs. Le granulé est le combustible le plus cher du chauffage au bois.

b) Ses avantages comme combustible bois

Les autres combustibles bois du chauffage domestique ont été cités et décrits en amont. La question est de déterminer les éléments qui font que les granulés sont le combustible bois le plus intéressant pour la réalisation d'un micro-cogénérateur.

Il y a de nombreux éléments qui permettent de juger de la qualité d'un combustible. Le Tableau 4 présente les différentes propriétés d'un combustible solide et les domaines sur lesquels ils impactent. Certains domaines de la production d'énergie impactés le sont par plusieurs propriétés du combustible. Il faut alors chercher un équilibre pour répondre aux objectifs.

Tableau 4 : Propriété du combustible et ses impacts sur la combustion [21,24,50,56,57].

Propriétés du combustible	Domaine impacté	Positif si :
Taille du combustible	Possibilité d'automatisation de l'amené de combustible	Taille faible
		Ratio Longueur/Diamètre faible
	Facilité d'allumage	Taille faible
	Vitesse de combustion	Taille faible
Distribution en taille	Facilité de régulation	Distribution homogène
Masse volumique apparente	Facilité de stockage	Masse volumique apparente importante
	Facilité d'allumage	Masse volumique apparente faible
	Vitesse de combustion	Masse volumique apparente faible
	Coût de transport	Masse volumique apparente importante
Masse volumique réelle	Densité énergétique	Masse volumique importante
	Vitesse de combustion	Masse volumique réelle faible
Humidité	Densité énergétique	Humidité faible
	Température de combustion	Humidité faible
Pouvoir calorifique	Densité énergétique	Pouvoir calorifique élevé
Taux de cendres	Densité énergétique	Taux de cendres faible
	Emission de particules	Taux de cendres faible
	Entretien de l'appareil	Taux de cendres faible
Teneur en Azote (N)	Pollution atmosphérique	Teneur faible

Le Tableau 5 présente un récapitulatif des propriétés des différents combustibles bois. Les granulés possèdent avec les plaquettes la plus petite taille qui convient à une mécanisation de l'arrivée de combustible. Les bûches et les briquettes sont de taille trop importante. Face aux plaquettes, les granulés sont beaucoup plus homogènes, ce qui facilite la régulation de la combustion. Les briquettes possèdent la masse volumique apparente la plus forte, les granulés se placent en deuxième position. Les plaquettes de bois ont une très faible masse volumique apparente,

cela leur permet de délivrer rapidement leur énergie mais suppose des problèmes de transports et de stockage. L'humidité des plaquettes est très variable et donc difficilement compatible avec la recherche d'une température de flamme importante et stable. Les combustibles compressés ont une humidité largement inférieure, donc un pouvoir calorifique plus élevé, mais sont sensibles à l'humidité ambiante. Les combustibles comprimés requièrent un stockage avec une faible humidité ambiante. Leur taux de cendres est généralement plus faible car ils sont plus souvent exempts d'écorces.

Tableau 5 : Récapitulatif des caractéristiques des différents combustibles bois [47,50,51] et Normes NF EN ISO 17225-(2 à 5) :2014.

Propriétés du combustible	Bûches de bois	Plaquettes	Briquettes	Granulés
Taille du combustible	L=20 cm à 100 cm D=2 cm à > 15 cm	3,15 mm < P16 ≤ 16 mm	Grande variété de forme Grande variété de taille	D=6 mm ou D=8 mm 3,15 < L ≤ 40
Distribution en taille	Variable	Grande variabilité P16 (60% en masse) ≤ 3,15 mm (15% en masse) > 31,5 mm (6% en masse)	Homogène pour une forme donnée	Homogène < 3,15 mm (< 1%) > 40 mm (< 1%)
Masse volumique Apparente	Très variable (<500 kg/m ³)	BD150 ≥ 150 BD200 ≥ 200 BD250 ≥ 250	Fonction de la forme et de la méthode de rangement > 800 kg/m ³	> 600 kg/m ³
Masse volumique Réel	Selon essence de bois de 400 kg/m ³ à 750 kg/m ³	Selon essence de bois	900 kg/m ³	900 kg/m ³
Humidité	20 à 40%	20 à 40%	< 12%	< 10%
Pouvoir calorifique	9 kJ/kg à 15 kJ/kg	9kJ/kg à 15kJ/kg	≥ 15,5MWh/kg	≥ 16,5 MWh/kg
Taux de cendres	Dépend de la présence d'écorce < 1,5%	< 1%	< 1%	< 0,7%
Teneur en Azote (N)	< 0,3%	< 0,3%	< 0,3%	< 0,3%

Les granulés sont donc le combustible bois possédant le plus d'avantages pour répondre au projet de conception d'un micro-cogénérateur. L'entrée dans le système de production d'énergie peut être mécanisée et régulée. La densité énergétique est importante permettant de mieux gérer la quantité d'énergie pour la production d'une température de flamme élevée. Enfin, le taux de cendres est faible, cela permettra de limiter les envols et diminuer les besoins de maintenance. Notons aussi la très grande homogénéité de la qualité des granulés qui permettra d'assurer un fonctionnement stable. Le principal inconvénient des granulés est leur coût plus élevé que celui des autres combustibles bois. Leur homogénéité et leur fort pouvoir calorifique permettent cependant de compenser en partie ce problème en obtenant des rendements élevés dans les appareils.

1.3. Les granulés de bois en France

La France est le 5^{ème} producteur européen de granulés avec 7% de la production, le premier producteur d'Europe est l'Allemagne avec 11,25%. Néanmoins, la France importe peu, elle a importé en 2016 environ 7 fois moins que le Royaume-Unis qui est le premier importateur de granulés. Au niveau des exportations la France est 14^{ème} en Europe. En comparaison la Lettonie, l'Estonie et la plupart des pays de l'Europe de l'Est exportent la totalité de leur production voire plus en exportant une partie de leur importation. [58]

Globalement, comme le montre la Figure 14, la production et les importations de granulés sont en augmentation en France depuis 2012, les exportations semblent quant à elles se stabiliser. Ces tendances montrent une augmentation de la demande, donc un marché en plein développement.

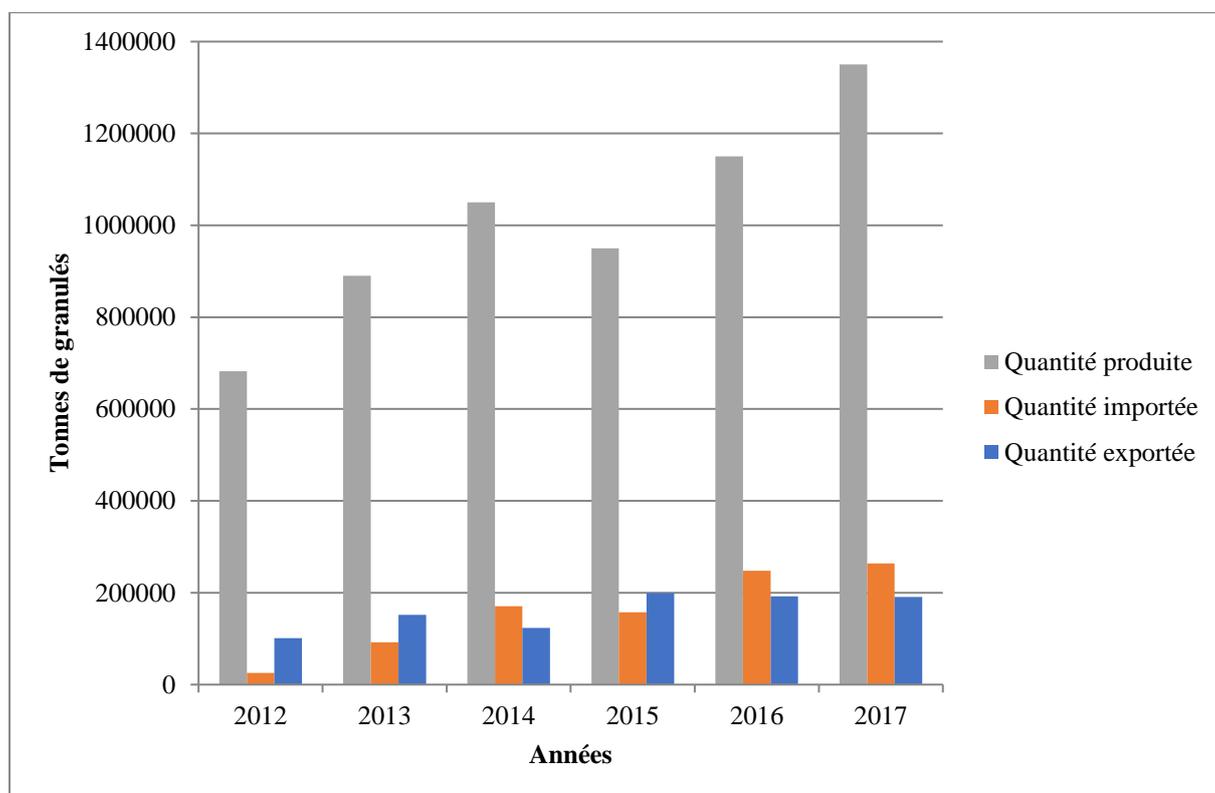


Figure 14 : Production française de granulés comparait aux importations et exportation en fonction des années [58].

Les énergies renouvelable (EnR) représentent 9,4% de la consommation d'énergie primaire en France métropolitaine et le bois est la première des EnR (40% des EnR) [59]. Dans le chauffage domestique, le bois représente 18% des combustibles utilisées. En 2013, 533 500 tonnes de granulés de bois ont été consommés dans le chauffage (en France). Le bois bûche est le plus utilisé avec 95% de l'énergie fournie par des combustibles bois, les granulés sont à 3%. [60]. Cependant, les ventes d'appareils fonctionnant aux granulés de bois sont en croissance et ce malgré une forte régression du marché des appareils de chauffage au bois depuis 2014, comme montré sur la Figure 15.

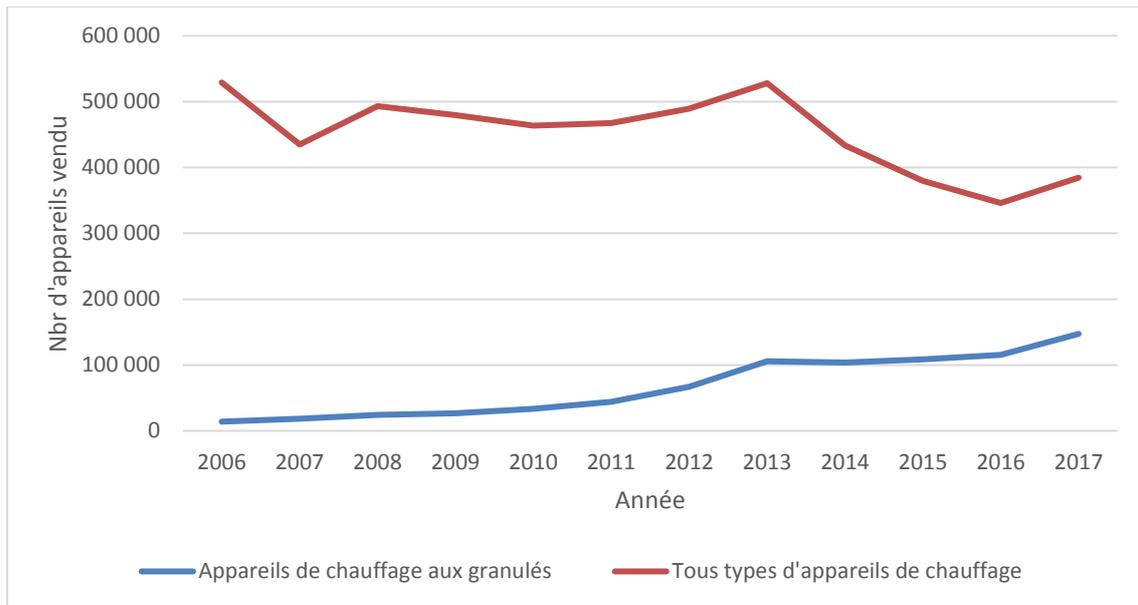


Figure 15 : Suivi des ventes d'appareils de chauffage au bois en comparaison des ventes d'appareils fonctionnant aux granulés, données [61,62].

La baisse des ventes s'est surtout fait ressentir pour les chaudières à granulés, le nombre des produits vendus a chuté de 34% depuis 2014. Dans les autres secteurs la tendance observée est inverse pour les granulés, croissance de la demande des poêles, +15% entre 2014 et 2016, quand le marché des poêles perd 33% du nombre d'appareils vendus. [61]. Entre 2016 et 2017, il y a une augmentation du nombre global d'appareils vendus (+11%) entraîné par une augmentation du volume des ventes des appareils de chauffage fonctionnant aux granulés de bois (+28 %) [63].

2. Production de chaleur domestique à partir du bois

Le bois fut la première source d'énergie utilisée par l'homme avec la découverte du feu 1,4 millions d'années av. JC et sa domestication 400000 ans av. JC. Ce fut pendant très longtemps l'énergie universelle qui allait avec l'Homme : où il y a du feu il y a des Hommes. C'est l'énergie qui chauffe, illumine, permet de faire la cuisine et de réaliser des outils. Le feu est le centre de la maison, il est devenu le centre des activités sociales de l'Homme [64]. Le bois fut le combustible universel puis il fut en grande partie remplacé, dès le XVème siècle en Angleterre, par le charbon de terre (tourbe) suite à l'augmentation de la demande en énergie, inhérente à la forte augmentation démographique, et la diminution de la ressource par remplacement des zones forestières par de l'agriculture [65]. Puis petit à petit le bois a été remplacé dans le chauffage domestique par le charbon, puis le gaz et l'électricité. Aujourd'hui le bois représente 18% de l'énergie fournie dans le chauffage domestique.

Actuellement, le réchauffement climatique, la prise de conscience de la limite des stocks des énergies fossiles et l'impopularité du nucléaire conduisent au développement des énergies renouvelables comme le bois. Le bois est un combustible complexe, comme présenté précédemment, son utilisation dans un micro-cogénérateur est un défi. Pour répondre à ce défi, il a d'abord fallu choisir la voie de production d'énergie. C'est pour cela qu'une première partie est consacrée aux différentes transformations thermo-chimiques du bois, afin d'avoir une idée plus

précise des phénomènes mis en jeu lorsque le bois est en contact avec de la chaleur et la manière dont le bois permet la production de chaleur, notamment pour obtenir de fortes températures.

Dans notre monde moderne, il existe une multitude d'appareils de chauffage au bois. Des plus rudimentaires, l'âtre de cheminée à foyer ouvert, au plus technologiquement développé, les chaudières automatiques aux granulés, ces appareils ont des rendements très divers. Une revue de ces appareils de chauffage domestique est le deuxième sujet abordé. Elle permet de se représenter les différentes technologies existantes dans le domaine, leurs avantages et inconvénients.

Enfin, le dernier point abordé est le dimensionnement des systèmes de combustion. Les connaissances dans le domaine ont permis d'établir des règles afin d'optimiser la combustion. Ces recommandations sont décrites ici pour comprendre la démarche de conception utilisée par la suite. Ce point se termine par une brève description de l'intérêt de la simulation numérique dans le dimensionnement des appareils de chauffage.

2.1. Les différentes transformations thermochimiques du bois

Notre objectif étant de produire de la chaleur à haute température, les voies thermochimiques semblent les plus appropriées. Les différentes transformations thermochimiques du bois sont présentées rapidement ci-après. Pour le développement d'un micro-cogénérateur, nous nous intéressons à la production de chaleur directe. Le procédé de transformation mis en jeu est la combustion. Cependant, cette combustion peut être directe ou étagée.

La combustion est une réaction complexe dans laquelle intervient la pyrolyse, la gazéification et enfin la combustion des gaz [66]. Ces différents mécanismes sont décrits afin de mieux comprendre la combustion et déterminer les paramètres clés permettant son optimisation.

2.1.1. La pyrolyse

La pyrolyse est la réaction de base pour tous les procédés de conversion thermochimique du bois [67]. C'est la dégradation du bois en atmosphère inerte (sans présence d'oxygène) sous l'effet de la température. La pyrolyse produit des gaz, des huiles pyroligneuses et du charbon. Les proportions dépendent de la vitesse de chauffe et de la température finale. La vitesse de chauffe dépend du flux de chaleur reçu à la surface du combustible et du transfert par conduction dans le combustible. Le bois est un mauvais conducteur de chaleur, le rapport surface/volume a donc une grande importance dans la conduite de la pyrolyse. Pour une température finale modérée (~500°C), une vitesse de chauffe importante favorise la production de liquides, une vitesse faible celle de charbon. Pour une température de traitement élevée (~1000°C) et une vitesse de montée en température importante, la production de gaz est favorisée [68–71]. La Figure 16 présente l'influence de la température, du temps de séjour et de la puissance de chauffe sur les rendements en produit de pyrolyse.

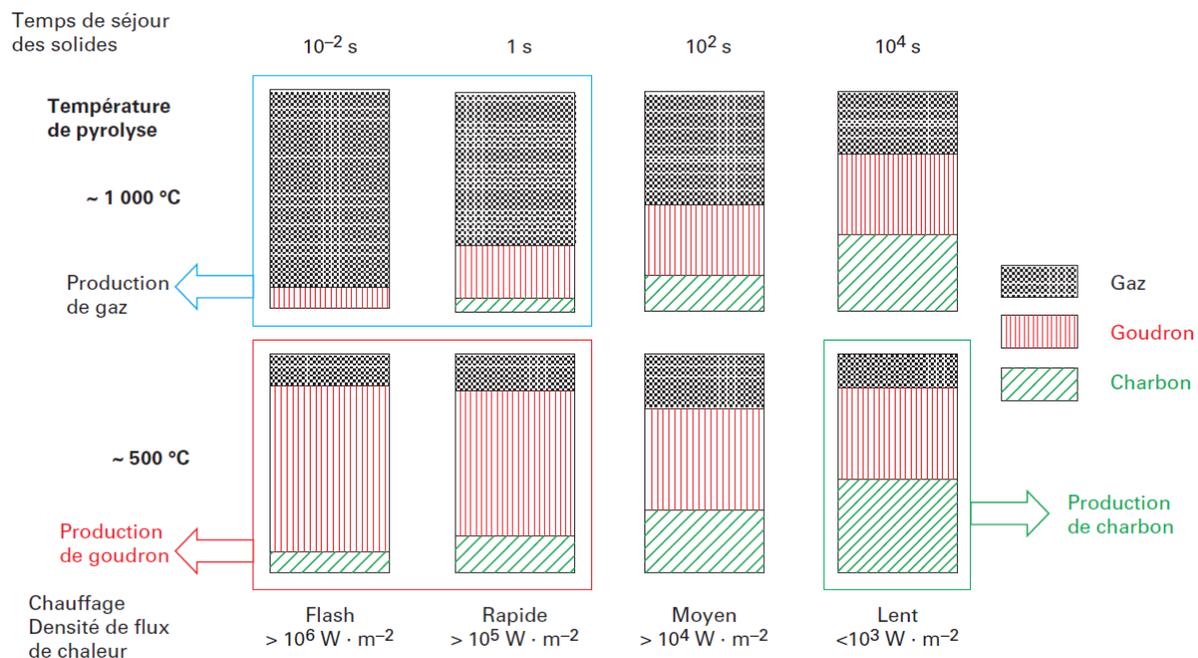


Figure 16 : Influence de la température, du temps de séjour et de la puissance de chauffe sur la nature des produits de pyrolyse [68].

La pyrolyse est une réaction qui peut être divisée en 4 phases successives (A, B, C et D) [68,72–74] :

- La zone A se situe pour des températures inférieures à 200°C. Durant cette étape il y a séchage du combustible en surface et début de dégradation. Cette dégradation entraîne une très faible production de dioxyde de carbone, acide formique, acide acétique et glyoxal.
- Entre 200°C et 280°C, la zone B, les mêmes produits que dans la première zone sont retrouvés et il y a début de carbonisation. La zone A s'est décalée plus en profondeur dans le bois. Les réactions se produisant lors de ces deux phases sont globalement endothermiques, ce sont principalement des réactions primaires qui décomposent les polymères du bois. Les produits sont du charbon primaire, des gaz condensables et des gaz non-condensables.
- Pendant que les zones A et B continuent leur progression dans le bois, la température de surface se trouve entre 280°C et 500°C, c'est la zone C. Le dégagement de gaz se fait plus important, la vitesse de décomposition des différents constituants du bois est la plus importante. Les réactions primaires sont suivies de réactions secondaires. Les réactions secondaires sont des réactions de craquage ou de recombinaison. Au global cette étape est exothermique du fait des réactions secondaires [75].
- Enfin à des températures supérieures à 500°C, zone D, il y a formation du charbon de bois. Le charbon devient de plus en plus concentré en carbone, et les réactions secondaires sont de plus en plus importantes et mènent à la production de gaz à fort pouvoir calorifique (H_2 , CH_4 , C_2H_2 , etc.).

De manière générale, le terme de pyrolyse est utilisé lorsque le produit recherché en fin de cycle est l'huile de pyrolyse. Si c'est le solide, en fonction de l'état de dégradation, les termes utilisés sont torréfaction et carbonisation. Lorsque le gaz est le produit recherché, le terme de

« *gazéification* » sera employé, même si la gazéification est aussi une forme de dégradation thermochimique particulière. La torréfaction et la carbonisation sont détaillées ci-après.

2.1.1.1. La torréfaction

La torréfaction est une pyrolyse pour laquelle la température maximale se situe entre 200 et 300°C. Le temps de séjour dépend essentiellement du résultat souhaité, mais il est de l'ordre de plusieurs dizaines de minutes, voire plusieurs heures. Dans la torréfaction, l'intérêt est de conserver un maximum de solide tout en le densifiant énergétiquement, d'augmenter la proportion de carbone en réduisant principalement celle d'oxygène. A ce niveau de température, il y a dépolymérisation et carbonisation des hémicelluloses.

La torréfaction a pour objectif de modifier les propriétés du bois pour améliorer ses caractéristiques. Après torréfaction, le solide obtenu est un intermédiaire entre le bois et le charbon. Il possède un meilleur PCI que le bois de l'ordre de 20 à 25MJ/kg. Contrairement au bois, le produit est plus résistant aux attaques de champignons, des insectes et des bactéries. Il a l'avantage d'être broyable plus facilement (du fait des pertes de propriétés mécaniques lors de la torréfaction), ce qui est très avantageux dans les procédés nécessitant une pulvérisation du bois sous forme très fragmentée [76,77].

Aujourd'hui la torréfaction est essentiellement utilisée par l'industrie en substitution du charbon. Elle permet aussi un gain sur le transport grâce à sa densité énergétique plus élevée [78–80].

2.1.1.2. La carbonisation

La carbonisation est une pyrolyse lente où la température finale varie entre 500 et 900°C. Le temps de séjour du bois varie entre plusieurs jours et plusieurs semaines. La carbonisation est le procédé de production de charbon de bois, il est utilisé depuis des siècles.

L'intérêt de la carbonisation réside dans la forte augmentation du PCI (>30 000kJ/kg), mais il est long à obtenir, les rendements de production et les quantités produites sont faibles. La carbonisation n'a pas d'intérêt pour la production d'énergie dans la micro-cogénérateur.

2.1.2. La gazéification

La gazéification est la voie de dégradation thermochimique du bois visant la production d'un mélange gazeux. Cette dégradation se fait en présence d'un gaz réactif ; typiquement de l'air, du dioxygène, de la vapeur d'eau ou du dioxyde de carbone. Le gaz réactif injecté a alors pour objectif de convertir le charbon et les liquides en gaz par oxydation partielle. Le gaz obtenu doit être riche en CO et H₂, mais contient aussi des hydrocarbures (CH₄, C₂H₂, ...). Lorsque l'agent de gazéification est de l'air ou de l'O₂, la teneur en oxygène reste sous stœchiométrique. Les propriétés du milieu et le gaz réactif utilisé font varier la composition du mélange gazeux qui résulte de la gazéification. Les produits de la pyrolyse sont le charbon, une huile, et un gaz. Ce gaz pourra donc ensuite être utilisé comme combustible dans un moteur ou transformé en biocarburant.

La gazéification se déroule en plusieurs étapes dont l'ordre dépend du procédé utilisé. Comme dans tout procédé thermochimique du bois, la première étape est le séchage. Le bois est ensuite dégradé par pyrolyse avant d'entrer dans sa phase de gazéification. Une étape de combustion partielle peut avoir lieu afin d'apporter l'énergie nécessaire aux réactions pour que le système soit autotherme. Les réactions de gazéification mènent à la production de gaz de plus ou moins fort pouvoir calorifique (PC), les principales réactions sont regroupées dans le Tableau 6. Les gaz produits sont regroupés en fonction de leur PCI moyen [74,81–84] :

- La gazéification à l'air produit le plus faible PC du fait de la dilution du gaz produit dans l'azote de l'air. Le PCI est compris entre 3,5 et 7 MJ/m³, ce type de gazéification était réalisé dans les gazogènes des automobiles durant la seconde guerre mondiale. Le gaz peut aussi être utilisé en combustion directe.
- Un gaz avec un PCI moyen d'environ 10-15 MJ/m³ est obtenu par gazéification avec de l'oxygène ou de la vapeur d'eau ou encore avec des gaz recyclés. Ce gaz sert à la production de méthane (cas de la méthanation) ou de diesel Fischer-Tropsch.
- Un gaz à haut PCI, environ 31,5 MJ/m³, possédant une forte concentration en CH₄ est produit à partir des gaz de PCI moyen par méthanation, mais il peut aussi être produit par gazéification direct avec comme gaz réactif le dihydrogène.

Il existe différents types de gazogènes, les lits fixes et les lits fluidisés. Pour les lits fixes, il est possible de différencier les technologies dites à co-courant, contre-courant et à tirage transversal. Ces systèmes sont les plus anciens. Les réacteurs à lit fluidisé sont employés pour des puissances plus importantes et les technologies utilisées sont les lits bouillonnants et les lits fluidisés circulants. Les appareils de gazéification ne sont pas détaillés.

Tableau 6 : Principales réactions de gazéification et leur enthalpie à 25°C, repris de [81].

Réaction de gazéification		
Type de réaction	Réaction	ΔH à 25°C
Réaction sur le carbone		
Réaction de Boudouard, gazéification au dioxyde de carbone	$C + CO_2 \leftrightarrow 2 CO$	+172 kJ/mol
Gazéification à la vapeur	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	+131 kJ/mol
Hydrogazéification	$C + 2 H_2 \leftrightarrow CH_4$	-74,8 kJ/mol
Gazéification à l'air ou l'oxygènes sous stœchiométrique	$C + 0,5 O_2 \rightarrow CO$	-111 kJ/mol
Réaction d'oxydation		
Combustion du carbone	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394 kJ/mol
Combustion du monoxyde de carbone	$CO + 0,5 O_2 \rightarrow CO_2$	-284 kJ/mol
Combustion du méthane	$CH_4 + 2 O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2 H_2O$	-803 kJ/mol
Combustion du dihydrogène	$H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$	-242 kJ/mol
Réaction de changement de gaz à l'eau		
Réaction du gaz à l'eau	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41,2 kJ/mol
Réaction de méthanisation (RM)		
RM 1	$2 CO + 2 H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$	-247 kJ/mol
RM 2	$CO + 3 H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-206 kJ/mol
RM 3	$CO_2 + 4 H_2 \rightarrow CH_4 + 2 H_2O$	-165 kJ/mol
Reformage du méthane		
Reformage à la vapeur	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	+206 kJ/mol
Réaction de reformage	$CH_4 + 0,5 O_2 \rightarrow CO + 2H_2$	-36 kJ/mol

Pour la réalisation du micro-cogénérateur, dont la température à atteindre est de l'ordre de 1200°C, l'utilisation de la gazéification comme étape intermédiaire à la combustion s'avère être une option intéressante car elle permet d'atteindre des températures de combustion élevées [74,85] et peut réduire les teneurs en particules. Cependant, ce développement est long et dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes concentrés sur le développement global d'un premier système en partant sur la solution de la combustion qui semble plus rapide.

2.1.3. La combustion

2.1.3.1. Principe

La combustion du bois est la voie la plus directe de valorisation énergétique du matériau. Elle consiste en une première étape de séchage puis une étape de pyrolyse suivie de l'oxydation complète des gaz et du charbon. La Figure 17 présente le schéma de la combustion du bois. Le bois doit, au départ, être chauffé pour initier la pyrolyse. Puis, les gaz s'enflamment (c'est la combustion vive ou homogène), et le rayonnement de la flamme sur le solide fournit l'énergie nécessaire à l'entretien de la pyrolyse. Parallèlement, le charbon formé par la pyrolyse est oxydé lentement par l'apport d'O₂ de l'air : c'est la phase de combustion lente ou hétérogène. Lors d'une combustion de bois dans un appareil automatique, les différentes étapes se déroulent en même temps et dans la même zone. [27,36,66,68,85,86]

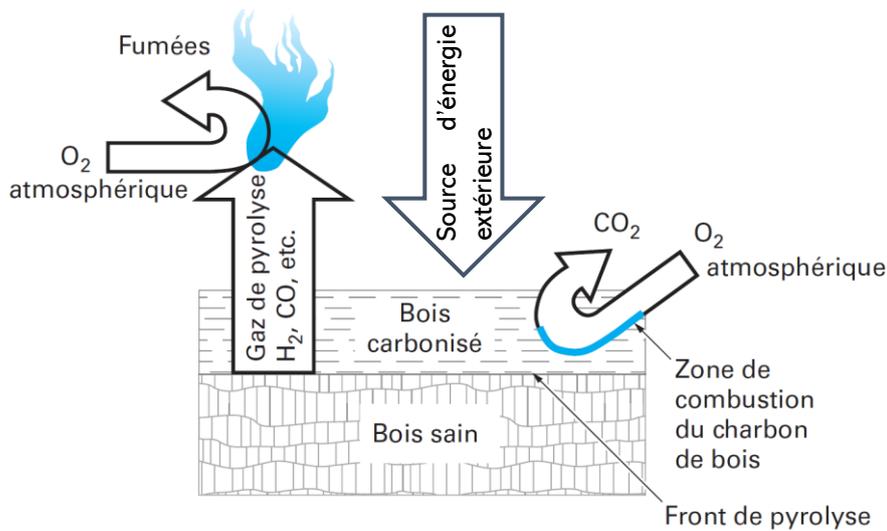
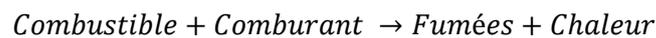
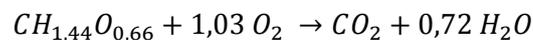


Figure 17 : Schéma de principe de la combustion [56]

En règle générale une réaction de combustion s'écrit :



La combustion du bois est décrite par l'équation de combustion complète avec de l'oxygène pur :

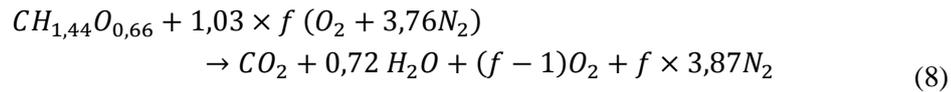


Lors de la combustion du bois dans un appareil de chauffage le comburant est de l'air. Pour obtenir une combustion complète, il est nécessaire d'apporter de l'air en excès afin d'être sûr d'oxyder l'ensemble des molécules de carbone ou d'hydrogène. L'excès d'air est indiqué sous deux appellations, l'excès d'air ou le facteur d'air. L'excès d'air « *e* » est le pourcentage d'air en plus de la stœchiométrie et le facteur d'air « *f* » est le ratio entre l'air réellement apporté sur l'air nécessaire pour être à la stœchiométrie.

Dans la suite le facteur d'air sera utilisé, les deux notions sont reliées comme suit :

$$\left(1 + \frac{e}{100}\right) = f \quad (7)$$

Ainsi l'équation générale de la combustion pour une mole de bois sec s'écrit :



Note : Dans cette équation, l'air est considéré comme étant constitué à 21% par de l'O₂ et 79% par du N₂ (composition volumique).

L'objectif dans la combustion est d'oxyder l'ensemble des molécules afin de récupérer le maximum d'énergie sous forme de chaleur contenue dans les fumées.

2.1.3.2. Dimensionnement des appareils de combustion

Le dimensionnement des appareils de combustion pour la production de chaleur domestique est lié aux performances à atteindre et à la sécurité de l'utilisateur. La norme NF EN 303-5 (2012-11-01) pour les chaudières définit « *des exigences et méthodes d'essai relatives à la sécurité, à la qualité de combustion, aux caractéristiques de fonctionnement et à la maintenance des chaudières de chauffage* ». Elle offre une base sur les caractéristiques attendues actuellement sur la combustion de bois dans les chaudières. Il en va de même pour les autres types d'appareils de chauffage.

Afin de répondre aux exigences formulées, le concepteur doit connaître les nombreux leviers de la combustion. Le combustible, ses caractéristiques et son alimentation sont des paramètres qui ont déjà été présentés précédemment. Dans cette partie, l'objectif est de présenter les paramètres qui permettent une oxydation complète du bois afin d'obtenir le maximum d'énergie. Le dimensionnement prend en compte des paramètres de base comme le combustible, la puissance de l'appareil souhaité et les exigences techniques. [87]

La combustion avec des arrivées d'air étagées est une solution désormais intégrée dans tous les procédés. Le principe étant de réaliser dans un premier temps une pyrolyse et gazéification du bois puis de faire la combustion des gaz dans un deuxième temps. Cette méthode permet de bien maîtriser les mécanismes, de favoriser la combustion complète et de diminuer la production d'imbrûlés ou/et de NO_x. [88]

Les NO_x sont des polluants, ils agissent sur la santé humaine en causant des problèmes respiratoires par fixation sur les alvéoles pulmonaires. Au niveau environnemental, ils sont en partie responsable de la détérioration de la couche d'ozone dans la stratosphère [89,90]. Les NO_x peuvent être produits selon trois voies [88,91-93] :

- NOx thermique, ils sont engendrés par la réaction entre l'azote de l'air et l'oxygène à haute température en suivant le mécanisme de Zelovich.
- NOx de carburant, ils sont formés à partir de l'oxydation de l'azote contenu dans le combustible.
- NOx rapide, ils sont produits par réaction entre les hydrocarbures dérivés de la combustion et l'azote de l'air.

La dépendance à la température de la formation des NOx pour la combustion de biomasse est présentée en Figure 18.

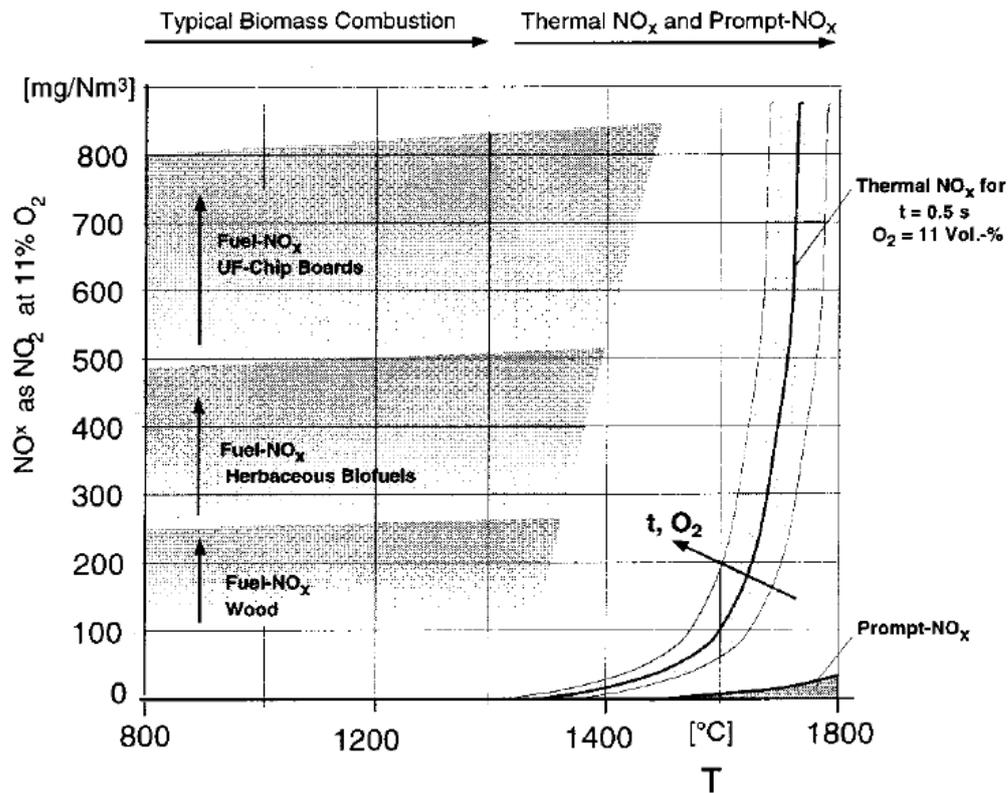


Figure 18 : Influence de la température sur l'émission de NOx pour la combustion de biomasse, extrait de [88]

Les paramètres permettant de favoriser une combustion complète sont regroupés dans la règle des 4T [94] :

- Température ;
- Teneur en oxygène ;
- Turbulence ;
- Temps de séjours.

L'influence de ces différents paramètres est détaillée ci-après.

a) *Température*

La température du milieu où se déroule la combustion doit rester importante afin que les différentes réactions puissent avoir lieu [85]. Une température supérieure à 850°C assure une bonne combustion [95]. La température provient de l'énergie libérée par les réactions d'oxydations, il faut ensuite conserver cette température (éviter les points froids en favorisant les turbulences dans le foyer par exemple). Cette température servira à chauffer le bois, à l'activation des réactions de craquage et enfin à la transmission de chaleur à la chaudière. Les pertes de chaleur par conduction et convection doivent donc être limitées au maximum. Ici, le choix des matériaux a une place importante pour limiter les pertes vers l'extérieur.

b) *Teneur en oxygène*

Comme citée précédemment la teneur en oxygène est symbolisée par le facteur d'air. Pour être complète la combustion du bois doit avoir lieu avec un léger excès d'air. Le monoxyde de carbone apporte une information sur la qualité de la combustion, plus la teneur est faible plus la combustion est complète. Cet excès d'air favorise l'oxydation des gaz de pyrolyse et du charbon. La Figure 19 présente pour différents appareils à combustion de bois le taux de monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air. Selon l'appareil le facteur d'air idéal se trouve entre 1,5 et 2 [86].

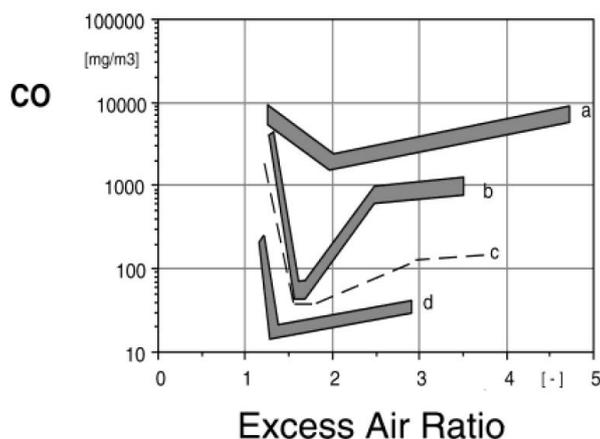


Figure 19 : Emission de monoxyde de carbone en fonction du facteur d'air pour différents appareils. (a) Poêle à bois, (b) Chaudière à combustion inverse, (c) Chaudière automatique, (d) Chaudière automatique avancé. Repris de [85,96].

La Figure 19 permet de voir dans le même temps l'évolution des appareils de chauffage au bois au niveau de la qualité de la combustion. Le poêle à bois en (a) est ici un appareil à bûche ancien avec la combustion se déroulant vers le haut et sans apport d'air secondaire. La chaudière à combustion inversé (b) est une première révolution dans le chauffage au bois, elle a permis d'augmenter notablement le rendement des appareils de combustion à tirage naturel. La chaudière automatique (c) permet d'intégrer une régulation de la combustion et permet ainsi d'optimiser la combustion. Les chaudières automatiques récente ont un design optimisé et une régulation plus

précise de la combustion, ce qui permet d'obtenir des performances élevées et une forte diminution du taux de CO synonyme de combustion incomplète.

Le problème avec l'augmentation du facteur d'air est la diminution de la température de flamme, ceci est dû à l'augmentation du volume d'air à chauffer. La Figure 20 présente pour différentes humidités la température adiabatique de la flamme en fonction du facteur d'air.

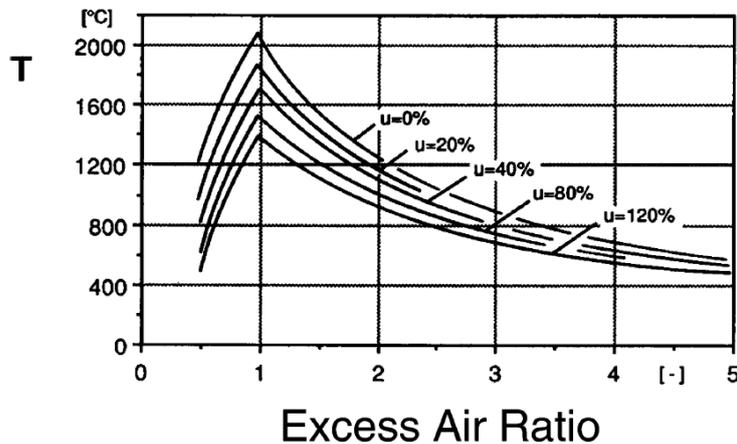


Figure 20 : Température adiabatique de flamme en fonction du facteur d'air pour différentes humidités u (Humidité sur sec) [85].

Lorsque la quantité d'air injectée dans l'appareil est inférieure à la stœchiométrie (Excess Air Ratio < 1) alors la combustion est incomplète et la température de la flamme diminue. La présence d'humidité diminue le PCIh du bois, donc la quantité d'énergie transmise à la flamme est moindre, ce qui a pour conséquence de diminuer la température.

Dans le cas où l'on veut obtenir une température importante dans le foyer, il faut alors se rapprocher au maximum d'un facteur d'air de 1. Cependant, pour obtenir une combustion complète il faut augmenter la quantité d'air qui par conséquent va diminuer le niveau de température.

c) *Turbulence*

La turbulence est importante pour assurer le mélange entre l'oxygène et les gaz de pyrolyse dans le but d'augmenter leur chance de se rencontrer et ainsi favoriser les réactions. La turbulence peut être créée par l'augmentation des débits d'air secondaire et un design favorisant le mélange des gaz. C'est un concept difficile à mesurer, l'utilisation de la simulation numérique permettrait de vérifier que le mélange entre les gaz est bien effectif.

d) *Temps de séjours*

Le temps nécessaire aux réactions d'oxydation est très faible, mais un temps de séjour suffisant est nécessaire pour favoriser la rencontre entre les différents gaz. Un temps de séjour compris entre 1s et 3s permet ainsi d'optimiser la combustion. Le temps de séjour est obtenu par le dimensionnement de la chambre de combustion en fonction du volume de fumées produit. [87]

La conception d'un appareil de combustion passe par des phases d'essais, que ce soit des simulations numériques ou bien des essais sur des prototypes. Les essais par simulations numériques sont réalisés en amont, ils servent essentiellement à confirmer et améliorer des éléments comme le design et le transfert thermique. Il y a de plus en plus de modèles numériques qui cherchent à prédire la qualité de la combustion dans les chaudières et poêles fonctionnant au combustible bois, en cherchant à modéliser une partie ou la totalité des phénomènes se produisant dans l'appareil (transfert de chaleur, mécanique des fluides et combustion) [97–103]. La modélisation permet de faire gagner du temps et surtout des moyens en permettant la fabrication uniquement de prototype avancé. Les expérimentations menées sur les prototypes permettent de confirmer les choix et de tester tous les réglages afin d'optimiser la régulation du système. La régulation est la garantie de la réduction des émissions, du maintien des performances énergétiques et de la sécurité de l'utilisateur. C'est grâce aux systèmes de régulation qu'il est possible d'atteindre des rendements de plus de 90%.

2.2. Les chaudières à granulés

Il existe différents types d'appareils de chauffage aux bois, divisés en 4 catégories : Inserts et foyers fermés ; les poêles à bois ; les cuisinières et les chaudières. Une très grande variété d'appareil existe sur le marché actuellement, variant en fonction de la nature du combustible et de leur utilisation. Les chaudières à bûches restent les appareils les plus présents du parc des chaudières bois, elles fonctionnent par batch, elles nécessitent l'installation d'un ballon tampon important pour augmenter l'autonomie. Elles ne sont pas compatibles avec notre projet du fait de leur fonctionnement intermittent et de températures plutôt faibles (700°C maximum). Le choix d'une chaudière à bois consommant des granulés est plus intéressant, ainsi seul cet appareil est présenté dans cette partie.

Les chaudières chauffent un fluide caloporteur (le plus souvent de l'eau) pour fournir de la chaleur au réseau de distribution de la maison (radiateur, planché chauffant, ...) et pour produire de l'eau chaude sanitaire. Les chaudières sont le plus souvent installées dans une pièce réservée, la chaufferie. En langage courant, une chaudière est composée de 2 parties principales : le foyer (lieu de la combustion) et l'échangeur (récupération d'énergie). En langage technique, la chaudière est uniquement l'échangeur de chaleur. Ici l'esthétique de la flamme n'est pas importante et toute l'attention du concepteur se tourne vers l'optimisation du rendement et la réduction des émissions.

Les chaudières à plaquettes et à granulés ont des fonctionnements similaires. Les plaquettes demandent tout de même plus de complexité du fait de l'hétérogénéité du combustible. L'alimentation automatique et la gestion précise de la combustion en font les appareils les plus performants du chauffage au bois, leurs rendements sont supérieurs à 85%. Il existe de nombreuses configurations différentes, chaque marque propose ses solutions et cherche à obtenir le maximum au niveau du rendement et le minimum d'émissions. Cette recherche a poussé les fabricants à développer des systèmes de plus en plus complexes. GUNTAMATIC® propose par exemple une chaudière murale avec une chambre de combustion cyclonique en matériau réfractaire [104], ÖkoFEN® propose une chaudière à condensation avec un rendement de 102,7% (sur PCI) [105], et MORVAN® travaille sur une chaudière inspirée d'un brevet pour un brûleur poly-combustibles [106].



Figure 21 : Installation d'une chaudière à granulés (1) avec Silo de stockage (2), un ballon tampon (3) et production d'eau chaude sanitaire (4) [107].

La Figure 21 présente une installation d'une chaudière à granulés (1) avec un silo de stockage textile (2), un ballon tampon (3) et un ballon de production d'eau chaude sanitaire (4). Le silo de stockage permet d'avoir une réserve d'énergie pour une longue période, il alimente la chaudière à l'aide d'une soufflerie. L'utilisation d'un ballon tampon n'est pas obligatoire mais permet l'utilisation de la chaudière sur une plus grande plage de besoin en chauffage. Enfin la chaudière à granulés peut aussi servir pour la production d'ECS.

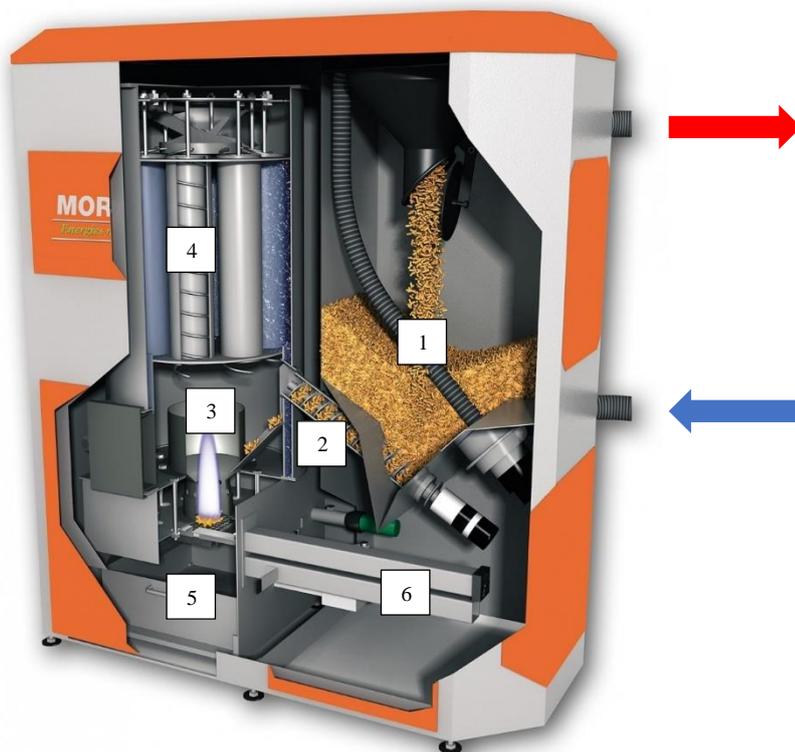


Figure 22 : Coupe d'une chaudière à granulés. Avec : (1) le réservoir tampon ; (2) la vis d'alimentation ; (3) le foyer ; (4) : l'échangeur ; (5) : le bac à cendre ; (6) : système d'extraction des cendres du foyer.

La Figure 22 présente une coupe d'une chaudière à granulés, le combustible en provenance du silo est soufflé dans le réservoir tampon (1) permettant à la chaudière d'avoir au moins 6h de fonctionnement sans recharger. Les granulés sont ensuite entraînés vers le foyer (3) par une vis d'alimentation (2). Les fumées produites par la combustion vont échanger leur chaleur dans l'échangeur (4) et les cendres sont évacuées vers le bac à cendre (5) avec dans certains cas une aide mécanique (6). L'eau de retour chaudière (flèche bleu) est alors chauffée dans l'échangeur pour ressortir au départ chaudière (flèche rouge) pour alimenter la distribution. Les fumées sont ensuite évacuées par la fumisterie.

3. La micro-cogénération

La micro-cogénération est le socle du projet. Dans cette partie nous allons la définir, expliquer ses grands principes et dévoiler quelques systèmes.

3.1. Définition

La cogénération (« combined heat and power » en anglais) est définie comme étant la production simultanée d'électricité et de chaleur à partir d'un combustible dans une même installation, les deux énergies produites étant utilisées. La directive européenne 2012/27/UE définit la micro-cogénération lorsque l'unité produit une puissance électrique égale ou inférieure à 50kWe . En France il est courant de parler de micro-cogénération pour les unités produisant moins de 36kWe . Le Tableau 7 présente un classement des unités de cogénération par gamme de puissance.

Tableau 7 : Classification des unités de cogénération en fonction de leur puissance.

Catégorie de cogénération	Gamme de puissance [108]	Gamme de puissance [109,110]
Grosse cogénération	$> 12\text{MWe}$	
Moyenne cogénération	1 à 12 Mwe	
Petite cogénération	250 kWe à 1 Mwe	$< 1\text{MWe}$
Mini cogénération	36 à 250 kWe	50 à 300 kWe
Micro cogénération	$< 36\text{kWe}$	$< 50\text{kWe}$

3.2. Principe

Le principe de la cogénération est décrit comme étant la production d'énergie mécanique qui permet ensuite la production d'électricité, la chaleur est alors considérée comme un résidu [111]. Mais les technologies telles que les piles à combustibles et les modules thermoélectriques n'ont nullement besoin d'un intermédiaire mécanique.

Dans la pratique, les micro-cogénérateurs doivent tout d'abord répondre à un besoin thermique, la chaleur représentant la plus grande part de l'énergie produite. Un cogénérateur quelle que soit sa taille doit donc être conçu sur la base d'un besoin en chaleur, celle-ci est consommée localement, alors que l'électricité peut être auto-consommée ou revendue au réseau. Dimensionner en fonction de l'électricité reviendrait à surdimensionner vis-à-vis du besoin en chaleur. La chaleur produite est alors perdue ce qui fait baisser le rendement global du système.

En France, l'arrêté du 3 novembre 2016 [112] fixe les conditions d'achat de l'électricité produite par cogénération au gaz naturel. Suite à cet arrêté, un tarif unique d'obligation de rachat de l'électricité appelé C16 a été mis en place [109]. Ce contrat permet de vendre la totalité de sa production en hiver, ou d'autoconsommer toute l'électricité produite, ou encore d'autoconsommer une partie de son électricité et de vendre le surplus à EDF OA. La revente d'électricité produite par la micro-cogénération avec le bois comme combustible devrait suivre le même schéma.

La chaleur est produite à partir d'un combustible, ce combustible peut être gazeux (Hydrogène, méthane, biogaz, etc.), liquide (fioul, gasoil, essence, etc.) ou solide (bois, charbon, déchet sec, etc.). Le rayonnement solaire est aussi une source de chaleur envisagée pour la cogénération. Toutes les technologies de production d'électricité ne sont pas adaptables à toutes les sources de chaleur. La génération d'électricité peut être réalisée via plusieurs systèmes [111] :

- Pile à combustible ;
- Moteur à combustion interne ;
- Moteur à combustion externe ;
- Technologie ORC ;
- Moteur à Vapeur ;
- Module thermoélectrique ;
- Micro-turbine

De toutes les technologies citées, seuls les 5 dernières peuvent fonctionner aux granulés de bois. Les rendements d'une partie de ces appareils pour des applications avec combustion de biomasse solide sont regroupés dans la Figure 23.

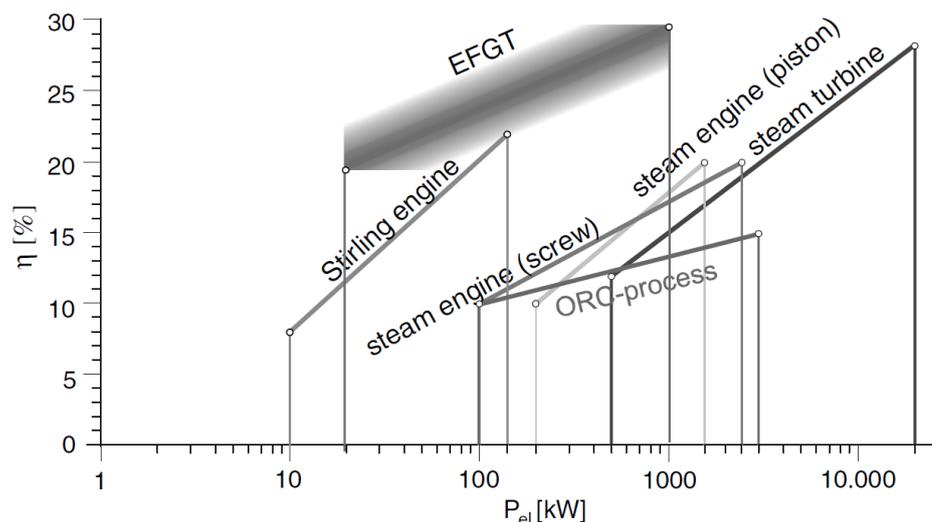


Figure 23 : Taille typique et rendement électrique d'installation de cogénération utilisant la combustion de biomasse solide [113].

Le système développé dans cette thèse n'entre pas dans le graphique car la puissance électrique produite est inférieure à 10kW. Le graphique montre que la technologie de la turbine à combustion externe (Externally Fired Gas Turbine : EFGT) permet d'obtenir les meilleurs rendements électriques, sur la gamme allant de 20 kW_e à 1000 kW_e.

3.3. Intérêts

L'intérêt de la cogénération provient du gain de rendement obtenu en comparant avec une production séparée équivalente d'électricité et de chaleur. De plus, cela permet de produire de l'électricité, une énergie à haute valeur ajoutée. La comparaison entre une production séparée et par cogénération est réalisée dans l'exemple suivant (cf. Figure 24) : Production de 1,5kW d'électricité et de 10 kW thermique avec :

- Une production séparée de chaleur et d'électricité. La production d'électricité prend en compte un rendement électrique de 39% qui correspond au rapport entre l'énergie finale et l'énergie primaire de la production d'électricité en France ($1\text{kWh}_{\text{EF}} = 2,58\text{kWh}_{\text{EP}}$). La production de chaleur est réalisée avec une chaudière classique avec un rendement fixé à 90%.
- Une unité de micro-cogénération ayant les caractéristiques attendues de celle développée dans cette thèse : rendement thermique de 78% et rendement électrique de 12%.

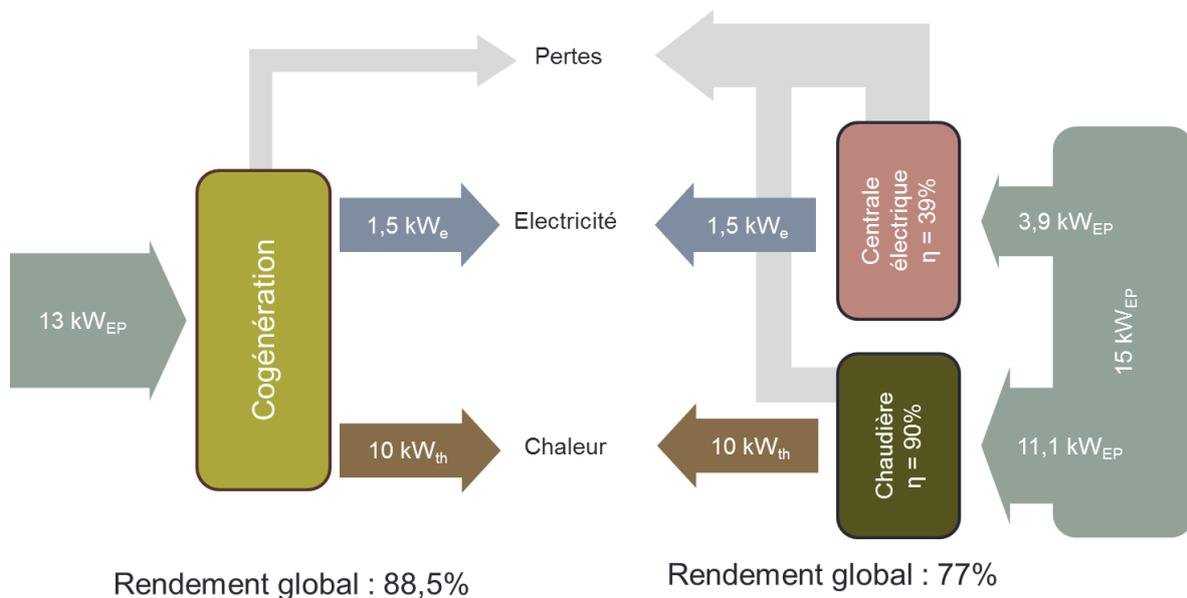


Figure 24 : Production d'électricité selon deux cas : production séparée (à gauche) et production par cogénération (à droite).

Le rendement global de l'installation de cogénération est de 88% contre seulement 77% pour le système à production séparée. Ainsi, pour répondre aux mêmes besoins, la quantité de combustible utilisée sera plus faible en cogénération. De plus, l'utilisation du bois comme combustible permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre en comparaison avec les énergies fossiles. En 2005, l'ADEME a publié un bilan environnemental du chauffage domestique au bois [114] dans lequel la combustion de granulés produit 11 fois moins de CO₂ que le fioul et 5 fois moins que le gaz, ces données sont illustrées sur la Figure 25.

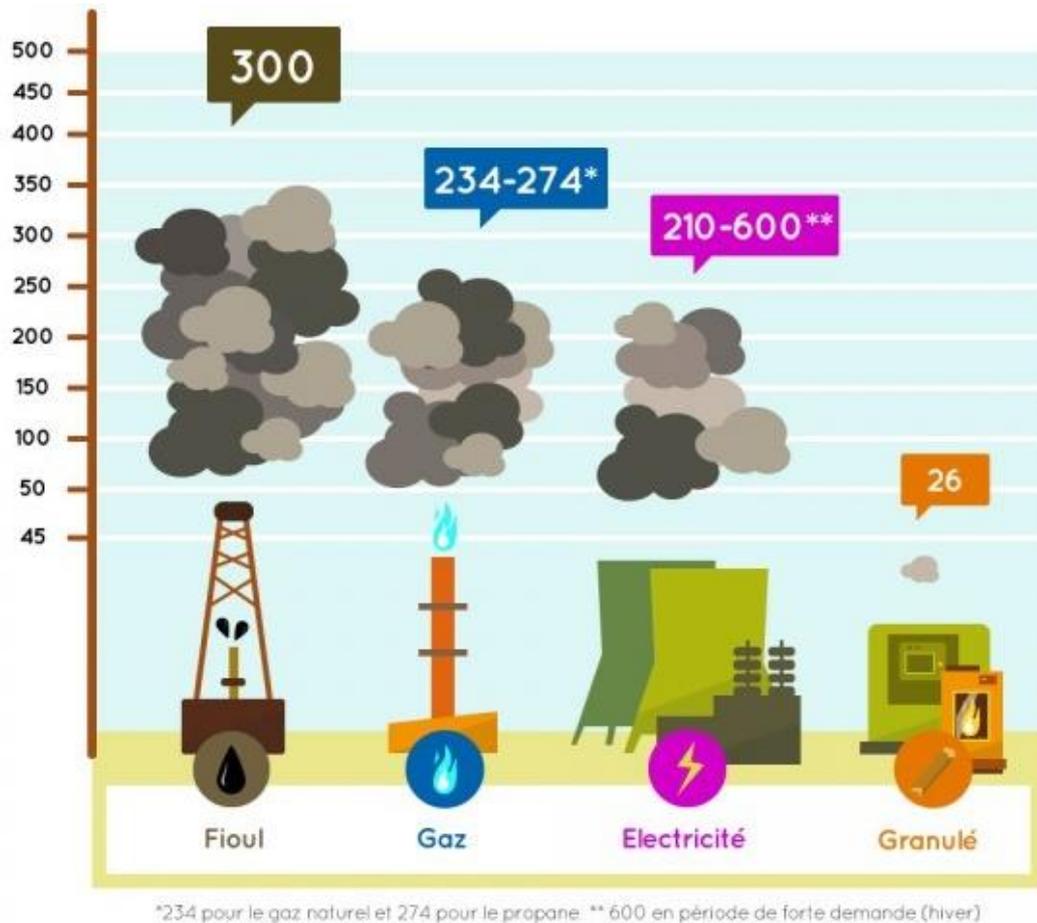


Figure 25 : Comparaison des émissions de CO₂ des combustibles de chauffages

Plus récemment, une analyse plus approfondie a été réalisée dans la thèse de Chloé Pelletier sur « l'analyse environnementale et économique des filières bois énergies » avec des scénarii de chauffe d'une maison de 100m² en Lorraine [115]. Elle montre que l'utilisation d'une chaudière à granulés de bois produit 3 fois moins de gaz à effet de serre qu'une chaudière fioul et 2 fois moins qu'une chaudière gaz à condensation pour répondre aux besoins énergétiques. Dans les deux études présentées, les résultats prennent en compte le bois comme une ressource renouvelable qui possède un cycle du carbone court et donc les émissions de CO₂ produites lors de la combustion ne sont pas comptabilisées.

3.4. Exemples de micro-cogénérateurs à usage domestique

Afin de positionner la technologie étudiée dans ce travail, il convient de faire un inventaire le plus exhaustif possible des micro-cogénérateurs commerciaux à usage domestique existants ou ayant existés. La technologie étudiée dans ce travail est la micro-cogénération par turbine à gaz utilisant le bois comme combustible. La présentation est divisée en deux catégories : les micro-cogénérateur fonctionnant avec une micro-turbine et les micro-cogénérateur utilisant le bois comme combustible.

3.4.1. Micro-cogénérateurs à turbine à gaz

A notre connaissance, il n'existe aujourd'hui sur le marché mondial qu'un seul appareil utilisant la technique d'une micro-turbine à gaz pour la production d'électricité domestique. Un autre système entre dans la catégorie des micro-cogénérateur (< 36 kVA) mais est plus adapté aux logements collectifs ou bâtiments tertiaires.

3.4.1.1. MTT (*Micro-Turbine Technology*) [116]

L'entreprise Micro-Turbine Technology (MTT) a conçu un micro-cogénérateur distribué sous la marque EnerTwin fonctionnant avec une turbine à gaz à combustion interne avec récupérateur, cf. Figure 26. Le carburant utilisé est du gaz naturel. Le système permet la production de 3,2kW d'électricité et 15,6 kW de chaleur. Le rendement électrique est de 16% et le rendement global est de 94%. Cet appareil est le concurrent principal de la technologie développée durant cette thèse car ses performances sont similaires et le produit est commercialisé.

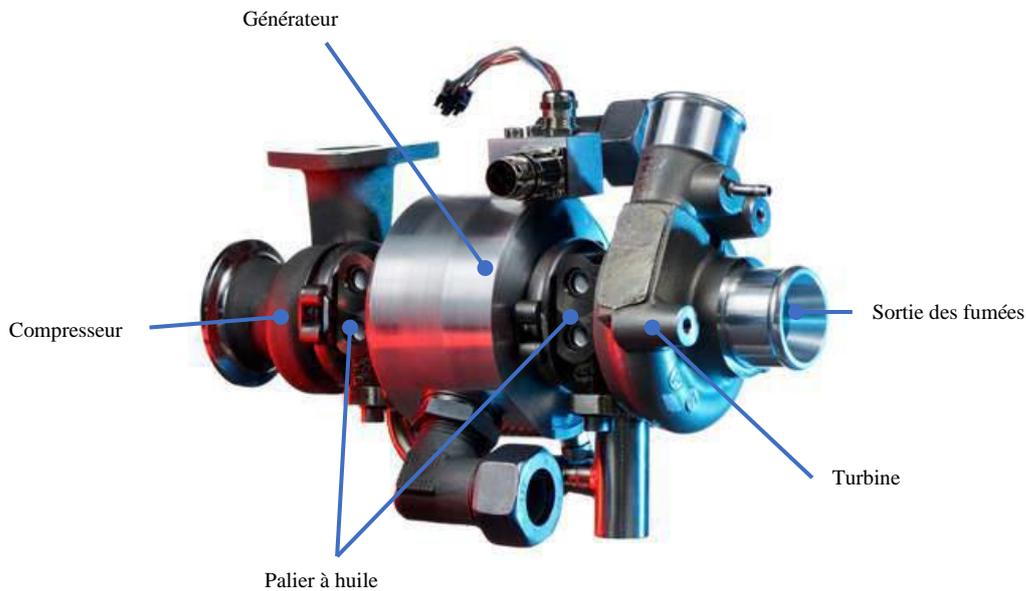


Figure 26 : Micro-turbine MTT pour la micro-cogénération

3.4.1.2. Capston C30 Micro-Turbine [117]

Le modèle de micro-turbine proposé par Capston permet la production de 30 kW d'électricité et de 65 kW de chaleur. Le système est compatible avec un grand nombre de carburant comme le gaz naturel, Syngas, Kérosène, etc. Le rendement électrique est de 26% et le rendement thermique de 64%, soit un rendement global de 90%. Ce type d'appareil n'est pas adapté au chauffage individuel du fait des puissances produites mais peut être installé comme chauffage collectif dans un immeuble d'habitation, dans des bâtiments de bureau ou même sur un petit réseau de chaleur d'habitation.

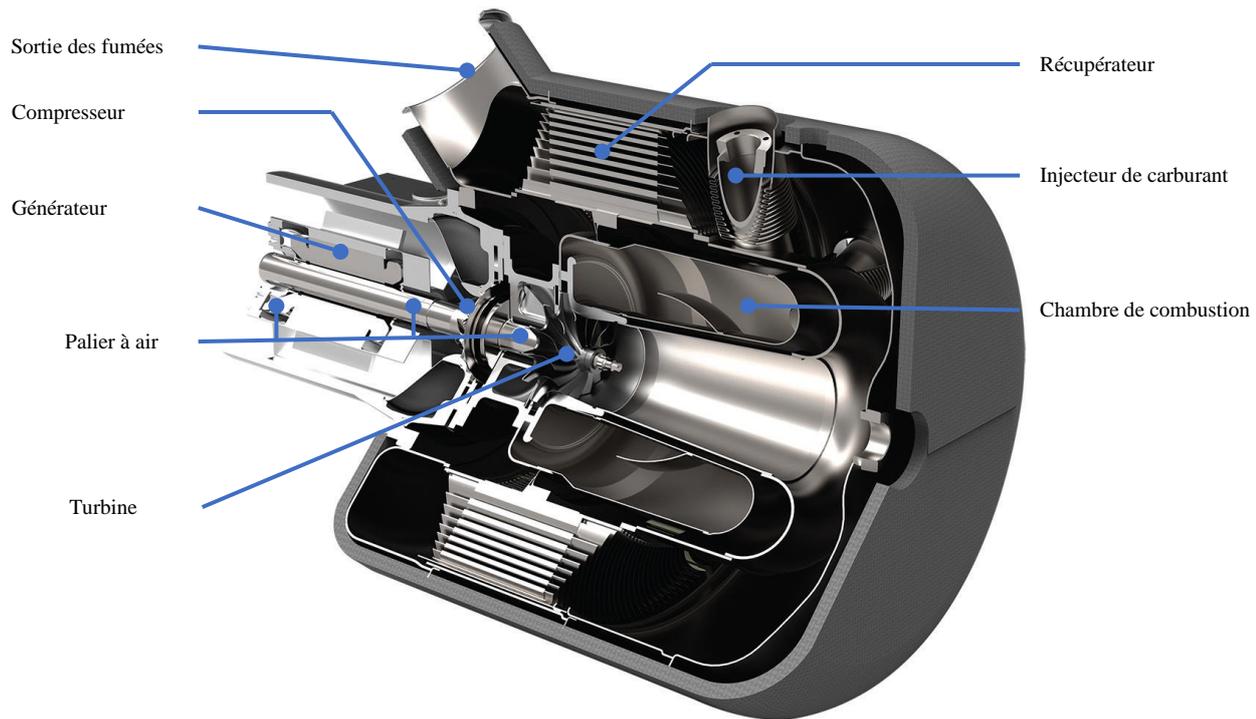


Figure 27 : Micro-turbine pour micro-cogénération Capston C30

3.4.2. Micro-cogénérateurs à granulés de bois

Plusieurs modèles de chaudière à micro-cogénération à bois sont apparus sur le marché des chaudières domestiques dans les années 2000, pourtant très peu sont encore présents. Plusieurs d'entre eux sont présentés avec leurs caractéristiques et leur situation actuelle.

3.4.2.1. SUN MACHINE

La SUN MACHINE, micro-cogénérateur aux granulés de bois, fonctionne avec un moteur Stirling pour la production d'électricité (cf. Figure 28). Les performances affichées par le constructeur sont de 4,5 à 10,5 kW thermique et une production électrique de 1,5 à 3 kWe. Le rendement global de l'appareil est de 90% avec un rendement électrique d'environ 20%.

L'entreprise SUN MACHINE a déposé le bilan en 2010 à la suite des difficultés techniques rencontrées.

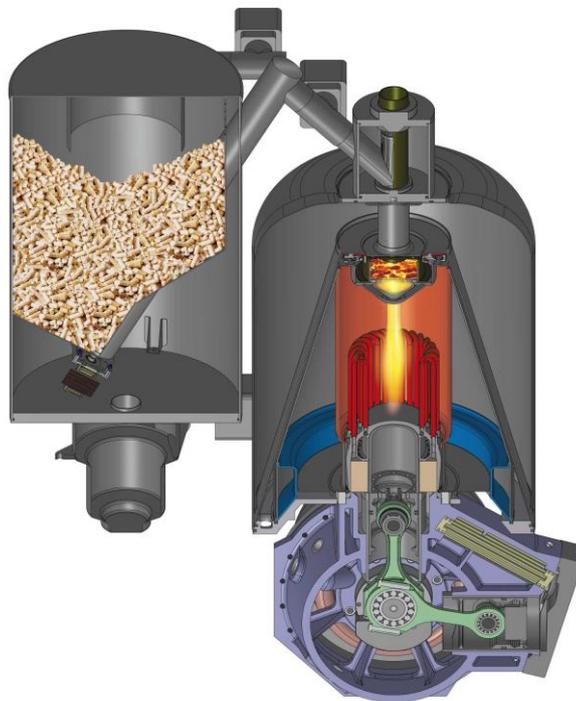


Figure 28 : Micro-cogénérateur aux granulés de bois à moteur Stirling SUN MACHINE®

3.4.2.2. COGEmax de Novotek industry

L'entreprise Novotek Industry a conçu un micro-cogénérateur aux granulés de bois fonctionnant dans un premier temps avec un moteur Sterling, puis avec un cycle organique de Rankine (ORC, Organic Rankin Cycle) avec une turbine Scroll (cf. Figure 29). Cette technologie a été primée au Salon Bois Energie en 2013 pour son innovation. Le modèle propose un rendement électrique de l'ordre de 10% : 1,5 kWe et 12 kWth pour un rendement total de 92%. L'entreprise a été mise en liquidation judiciaire en septembre 2016.



Figure 29 : Chaudière à micro-cogénération aux granulés de bois COGEmax de Novotek industry fonctionnant avec un cycle de Rankine

3.4.2.4. PELLEMATIC SMART_e et PELLEMATIC e-max du fabricant ÖkoFEN

La PELLEMATIC est une chaudière de série du fabricant ÖkoFEN, elle a été transformée en micro-cogénérateur à l'aide d'un moteur Stirling (cf. Figure 31). Le développement de l'appareil a commencé en 2010 avec la recherche d'un moteur Stirling. Le modèle Smart_e propose une solution de micro-cogénération produisant 0,6 kW électrique pour 9 kW thermique et le modèle e-max se place sur une gamme de puissance plus importante avec 3kW électrique pour 55kW thermique. Aujourd'hui la chaudière à micro-cogénération e-max est présente sur leur catalogue en ligne pour la France. ÖkoFEN est, à notre connaissance, à ce jour, le dernier acteur de la micro-cogénération aux granulés de bois, même si les ventes sont quasi-nulles.

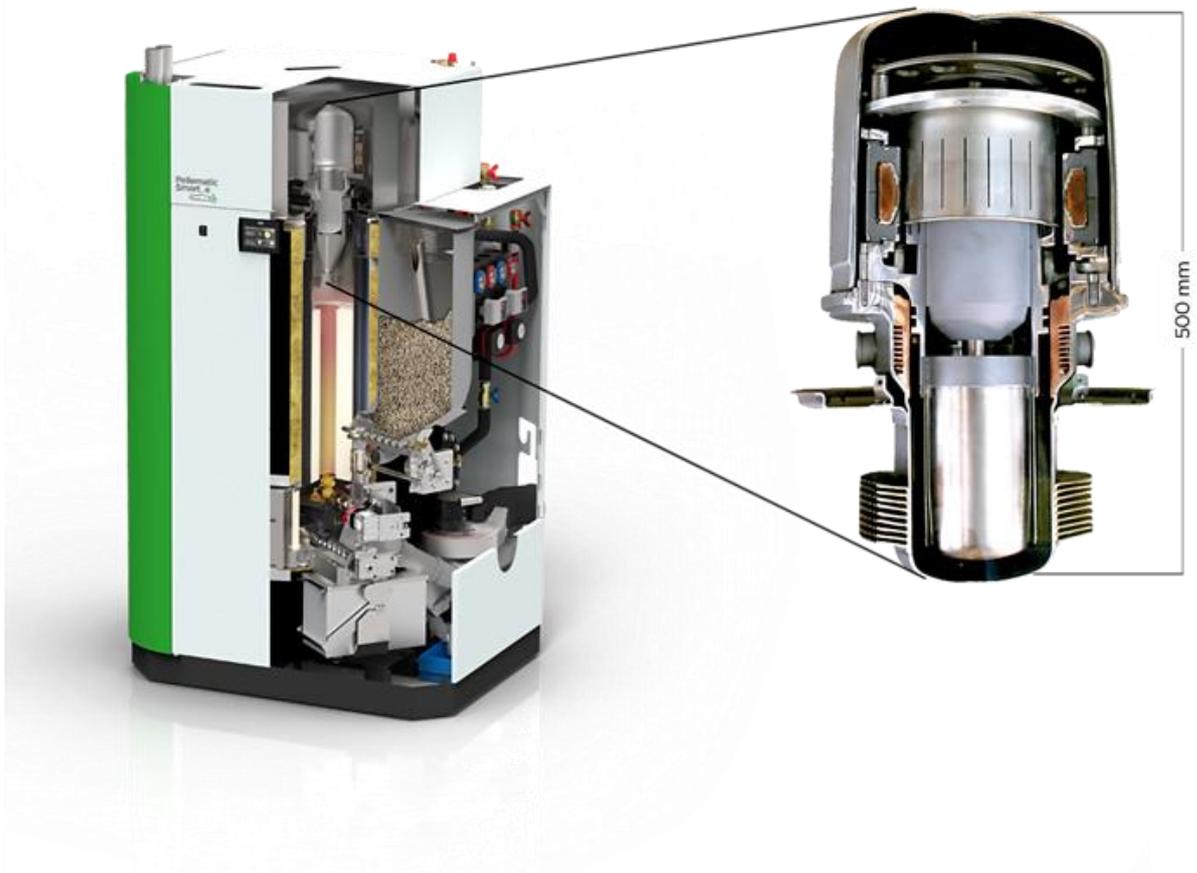


Figure 31 : Chaudière à micro-cogénération Ökofen Smart_e et son moteur Stirling.

3.4.2.1. Mini-cogénérateur SCHMID

L'entreprise suisse SCHMID propose trois cogénérateurs fonctionnant au bois. Ces cogénérateurs sont classés de la mini-cogénération à la petite cogénération. Chacun d'eux utilise un principe différent : un ORC (Organic Rankine Cycle), la gazéification avant combustion des gaz dans un moteur à combustion interne et enfin une EFGT à air chaud. [118]

Nous nous intéressons plus particulièrement au mini-cogénérateur fonctionnant à l'aide d'une EFGT. Il produit une puissance électrique entre 80 et 100kWe (avec un rendement électrique de 15%) pour une puissance thermique entre 300 et 350kW. Le mini-cogénérateur est présenté sur la Figure 32. La combustion est réalisée sur une grille dans le foyer (1). L'électricité est produite par la rotation (56 000 rpm) de la micro-turbine à air (2). L'énergie est fournie par l'échangeur fumée/air (3) (jusqu'à 850°C) et enfin la chaleur est récupérée dans l'échangeur fumée/eau (4).



Figure 32 : Mini-cogénérateur SCHMID HLT-100 Compact. (1) Chambre de combustion ; (2) Turbine ; (3) Echangeur thermique air/air ; (4) Echangeur fumée/eau.

Le schéma de principe utilisé pour faire fonctionner le mini-cogénérateur est repris en Figure 33.

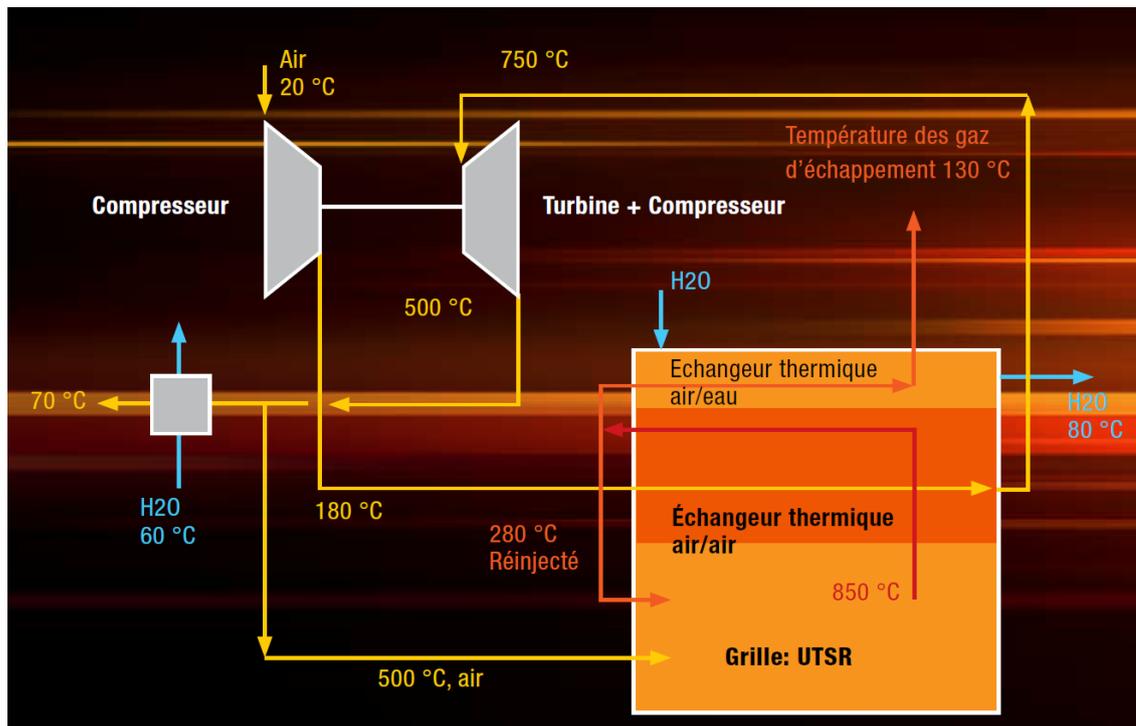


Figure 33 : Principe de fonctionnement du mini-cogénérateur SCHMID [6].

L'air après compression est chauffé dans un échangeur thermique air/air avant d'être détendu dans la turbine, qui à son tour entraîne le générateur. Une partie de l'air encore chaud de sortie de turbine sert à chauffer de l'eau et une autre retourne dans le foyer pour aider la combustion. Les fumées issues de la combustion traversent l'échangeur air/air, puis une partie retourne dans la chambre de combustion et l'autre partie traverse l'échangeur fumée/eau. Ce principe de fonctionnement est peu différent de celui mis en place durant cette thèse.

4. Positionnement du projet

Dans ce projet, le micro-cogénérateur aux granulés de bois est basé sur la technologie du cycle externe à air chaud. L'objectif du projet est d'intégrer la turbine pour produire environ 1,5kW électrique dans une chaudière existante permettant de récupérer 10kW thermique. Sur la Figure 34 est représenté le cycle externe intégré dans une chaudière à granulés. Le schéma de gauche est un schéma simplifié et celui de droite reprend la chaudière utilisée comme base et imagine l'intégration du cycle externe.

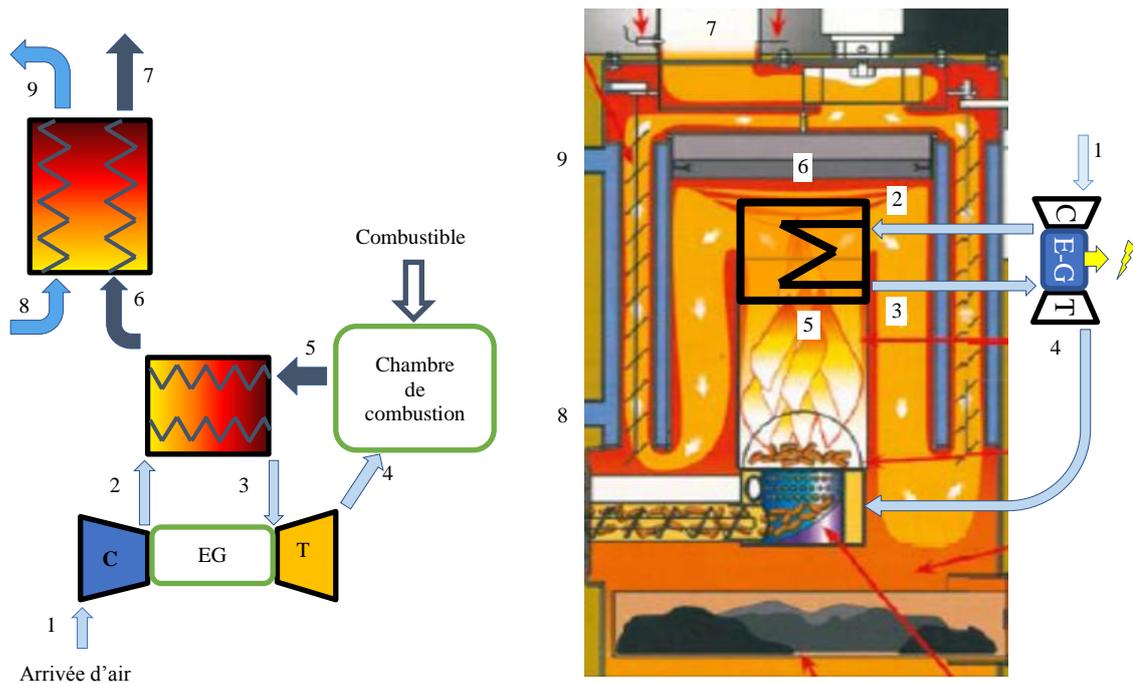


Figure 34 : Intégration du cycle externe de turbine à air chaud dans une chaudière à granulés.

Le principe de fonctionnement est relativement simple. L'air extérieur est comprimé (entre 1 et 2). L'air comprimé est chauffé (entre 2 et 3) dans l'échangeur de la turbine, il est ensuite détendu dans la turbine (entre 3 et 4). La différence de travail entre la turbine et le compresseur permet la mise en rotation de l'électrogénérateur qui produit l'électricité. L'air détendu et encore chaud est utilisé dans la chambre de combustion pour produire des fumées à haute température (entre 4 et 5). Les fumées distribuent une partie de leur énergie dans l'échangeur de la turbine (entre 5 et 6) et l'énergie résiduelle est récupérée dans un second échangeur (entre 6 et 7) qui permet de la restituer à un réseau de chaleur entre (8 et 9) pour permettre la distribution de la chaleur dans l'habitat.

Dans ce projet, la micro-turbine est dimensionnée et fabriquée par un prestataire, les éléments autour de la turbine doivent alors s'adapter aux besoins de la turbine pour fonctionner de manière optimale. La micro-turbine est basée sur un concept entièrement nouveau de conduits aérodynamiques coniques optimisés (canaux type tunnels ou hélicoïdaux) pour l'écoulement de l'air en substitution d'ailettes. La faible puissance recherchée entraîne de faibles dimensions géométriques. Elle implique l'utilisation de la fabrication par frittage laser pour permettre la réalisation des pièces qui possèdent une géométrie interne complexe. Le concept de turbine type à « *tunnel profilé ou spirale* » couplé à la combustion directe de biomasse sous forme de granulés constitue une véritable rupture technologique. La turbine à canaux coniques type tunnel a été validée (rendement et tenue aérothermodynamique) lors d'une étude menée en 2005 par l'ONERA dans le cadre d'un programme de la DGA (Direction Générale de l'Armement) sur une micro turbine céramique de 200 W. L'un des principaux défis du projet AGATCO est la conception et la réalisation d'une turbine de 1,5kW utilisant cette même technologie. Le travail effectué durant la thèse est de valider l'ensemble des éléments et de les intégrer à la production de chaleur par combustion de granulés de bois. Cette dernière est développée durant la thèse dans le but de respecter les contraintes liées au bon fonctionnement de la turbine, contraintes dictées par le concepteur de la micro-turbine.

Les performances du micro-cogénérateur sont directement liées au niveau de température atteint en entrée de la turbine, comme indiqué sur la Figure 35. Ce niveau de température dépend de deux paramètres : la température des fumées et l'efficacité de l'échangeur de chaleur.

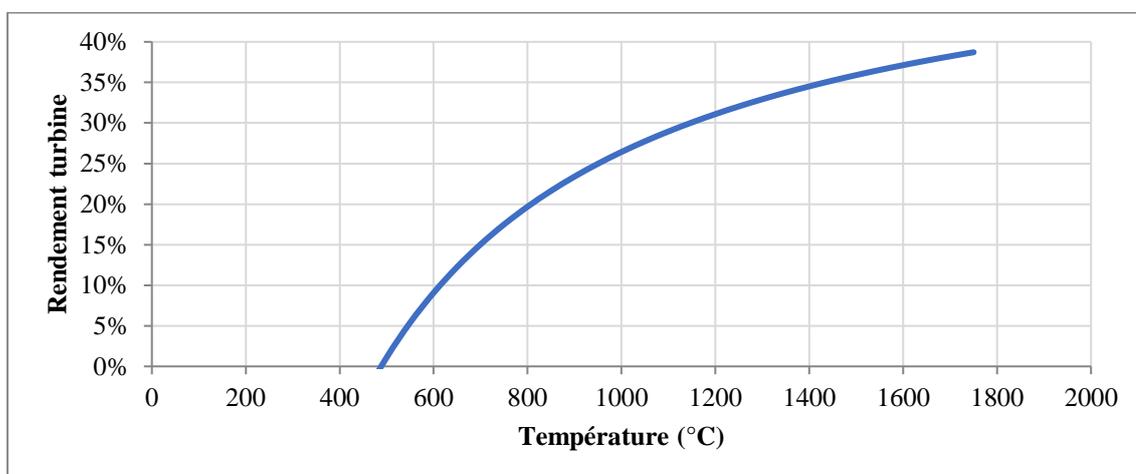


Figure 35 : Influence de la température entrée turbine sur le rendement, pour un échangeur d'une efficacité de 0,9.

Le niveau de température atteint dans le foyer est alors un point primordial pour maximiser le rendement de la turbine. Ce point a fait l'objet d'une précédente étude menée conjointement par le LERMAB et le LGRE (Laboratoire de Gestion des Risques et de l'Environnement de l'Université de Haute Alsace), le projet TURMIQUE. Ce projet, financé par l'ADEME, avait pour objectifs de concevoir et de réaliser un échangeur de chaleur destiné à la cogénération à haut rendement à partir de biomasse. L'augmentation de la température des fumées de combustion fut alors une des principales phases du projet.

Au niveau de la montée en température des fumées par combustion de granulés de bois, les températures obtenues avec une combustion avec de l'air préchauffé à 350°C et un facteur d'air proche de 1 sont proches de 1000°C au niveau de l'entrée de l'échangeur de chaleur. Les résultats obtenus dans le projet TURMIQUE sont illustrés dans la Figure 36. Les différentes notations utilisées dans la figure sont présentées ci-dessous :

- ThK air : Température d'entrée de l'air de combustion ;
- ThR AP : Température mesurée dans la chambre de combustion au niveau de l'arrivée d'air primaire ;
- ThR AS : Température mesurée dans la chambre de combustion au niveau de l'arrivée d'air secondaire ;
- ThR ech : Température mesurée dans la chambre de combustion au niveau de l'entrée de l'échangeur de chaleur ;
- Oxygène : Teneur en oxygène mesurée en sortie de la chambre de combustion.

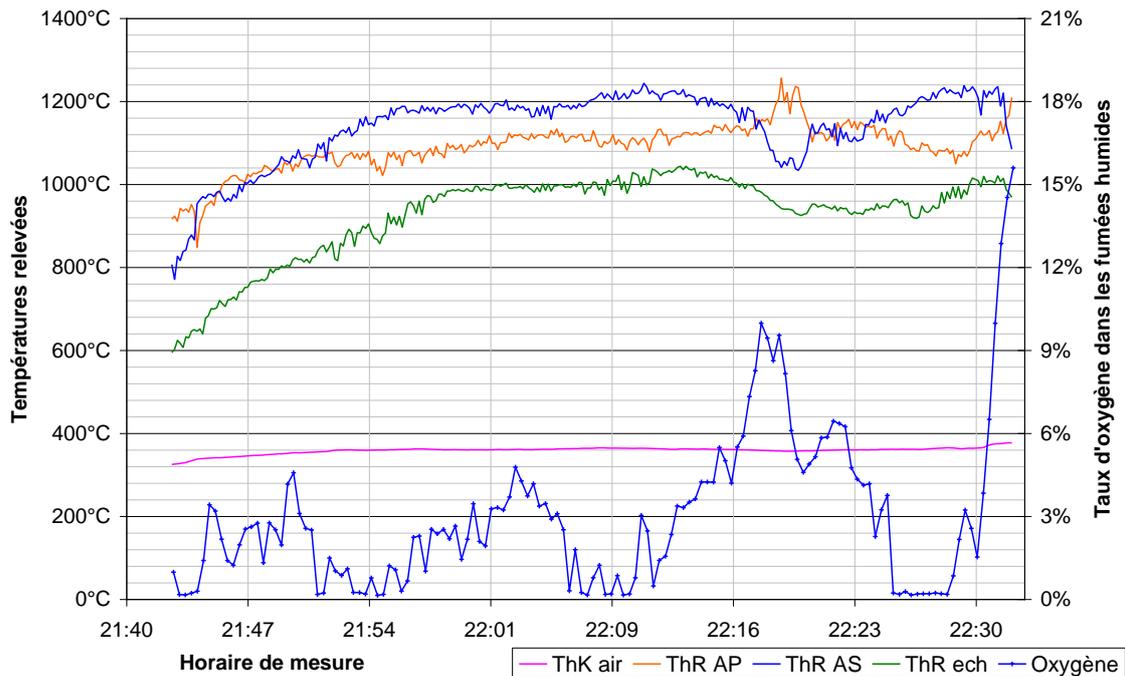


Figure 36 : Niveaux de température lors de la combustion de granulés en foyer adapté pour hautes températures.

La conclusion de ces essais est qu'une température importante peut-être atteinte avec de l'air préchauffé et un faible excès d'air (<5%). Les essais ont été réalisés en utilisant une chambre de combustion connectée au brûleur (pas d'entrée d'air à ce niveau) et directement reliée à la fumisterie sans passer par l'échangeur de la chaudière.

L'échangeur de chaleur a été fabriqué en céramique par frittage laser, celui-ci a présenté des fuites importantes entre le fluide froid et chaud. L'échangeur était constitué de deux échangeurs fabriqués en plusieurs étages empilés. Les observations aux rayons X ont montré de nombreuses malformations au niveau de l'intérieur de l'échangeur, et des soucis liés à la connexion des étages. Il a donc été recommandé de fabriquer un échangeur de chaleur monobloc et de vérifier la compatibilité de la céramique pour cet usage. L'ajout de cet échangeur n'a conduit à aucune modification sur les émissions gazeuses, mais il a été fortement encrassé. Il a été recommandé d'intégrer une technique de nettoyage pour améliorer la durée d'utilisation de l'échangeur dans des fumées issues de la combustion du bois.

Le projet TURMIQUE a lancé les bases du projet AGATCO et influencé les choix réalisés tout au cours de ce travail de doctorat. Dans AGATCO, il faut là aussi atteindre des températures importantes. Pour répondre à cela, il faut concevoir un brûleur qui réponde aux contraintes liées au fonctionnement à haute température. Puis, il faudra optimiser la chambre de combustion pour obtenir une bonne combustion tout en limitant les pertes de chaleur afin d'obtenir la température la plus élevée possible en entrée de l'échangeur. Le nouvel échangeur est conçu en prenant en compte les différentes recommandations. Il est testé pour vérifier qu'il possède bien le niveau de performance attendu. L'objectif final est d'intégrer à la chaudière existante la production d'électricité pour obtenir un prototype fonctionnel de micro-cogénérateur. Les fumées en sortie du premier échangeur devront donc aussi traverser l'échangeur de la chaudière avant de rejoindre la

fumisterie. Notons aussi que l'objectif initial du projet était de proposer sur le marché sous 5 ans un appareil commercial, tout le travail de thèse est réalisé en tenant compte des contraintes industrielles et économiques.

5. Conclusions de l'état de l'art

Ce chapitre était consacré à la description de l'état de l'art sur les domaines des combustibles bois, des voies de conversions thermochimiques et des appareils associés, notamment pour des usages domestiques. Le principe de la micro-cogénération a ensuite été abordé et les différentes technologies de micro-cogénérateurs à usage domestique présentes sur le marché ont été inventoriées. Cette veille technologique a alors mis en évidence le fait que la technologie choisie dans ce travail pour la micro-cogénération n'est pas exploitée à l'heure actuelle alors qu'elle peut être pertinente.

Le chapitre suivant aborde la production de chaleur haute température à partir de granulés de bois. Il détaille les étapes nécessaires à la conception des prototypes de brûleur et de chambre de combustion répondant aux contraintes liées d'une part à la haute température et d'autre part à la production d'électricité avec la micro-turbine. Puis, il présente les différents essais réalisés avec le dispositif afin de valider sa conception.

