

Projet de Physique P6
STPI/P6/2015 - 39

Le Bois Energie : étude de cas et comparaison

Etudiants :

Nicolas Berthault

Andréa Cassar

Philippe Corcoles

Dan Thanh Dang

Emmanuel Gasse Muñoz

Maëlys Jacq

Aude Quesney

Enseignant-responsable du projet :

Jamil Abdul Aziz



Date de remise du rapport : **15/06/2015**

Référence du projet : **STPI/P6/2015 – 39**

Intitulé du projet : **Le Bois Energie : étude de cas et comparaison**

Type de projet : **Biblio, calcul, visite, réalisation concrète**

Objectifs du projet :

- Organiser le travail au sein d'un groupe.
- Etudier l'organisation de la filière bois, sa consommation, son utilisation domestique et industrielle plus particulièrement en France.
- Contacter et visiter au minimum un réseau de chaleur.
- Expliquer le fonctionnement d'une chaufferie et l'organisation d'un réseau de chaleur.
- Etablir la comparaison avec d'autres sources d'énergies.

Mots-clefs du projet :

- **Bois**
- **Energie**
- **Chaufferie**
- **Réseau de chaleur**

Table des matières

1.	Introduction.....	5
2.	Méthodologie / Organisation du travail.....	5
3.	Le Bois Energie, une energie à fort potentiel.....	7
3.1.	Définition du bois énergie	7
3.1.1.	Bois, énergie renouvelable.....	7
3.1.2.	Les émissions.....	8
3.2.	Nos ressources de bois et l'exploitation.....	11
3.3.	L'industrie du bois	12
3.3.1.	Définition filière bois énergie	12
3.3.2.	Production d'énergie.....	12
3.3.3.	Impacts sociaux : création d'emploi.....	13
3.4.	Utilisation et consommation du bois énergie (domestique et industrielle)	14
3.5.	Fonctionnement d'un réseau de chaleur	15
3.5.1.	Fonctionnement d'une chaudière	15
3.5.2.	Organisation du réseau de chaleur associé à la chaufferie.....	17
4.	Etude de cas : les reseaux de chaleur (visites des chaufferies de grammont et maromme).....	18
5.	Le bois énergie dans la transition énergétique	24
5.1.	Niveau écologique (rejets en CO ₂ et en particules fines).....	24
5.2.	Niveau économique (prix, TVA.....)	25
5.3.	Politique et gestion	29
6.	Conclusions et perspectives	29
7.	Bibliographie.....	31
8.	ANNEXES.....	32
8.1.	Schéma extrait du document "Le bois, la première des énergies renouvelables"	32
8.2.	Tableau 1 : Sous-produits de la pyrolyse en fonction de la température	32
8.3.	Tableau du site mddelcc.gouv.qc.ca relatant les effets des fumées issues de la combustion du bois33	

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du projet de physique de deuxième année, nous avons dû réaliser un travail de documentation sur le sujet « Bois énergie : étude de cas et comparaison. ». L'enseignant responsable du groupe nous a ensuite précisé que l'étude concernerait plus spécifiquement les systèmes de chauffage au bois et que l'étude de cas porterait sur l'un de ces systèmes, les réseaux de chaleur.

Ce sujet est d'actualité puisque l'utilisation du bois de chauffage en France et les progrès techniques pour améliorer et favoriser son exploitation ont connu un important développement ces dernières décennies.

En effet, dans l'optique d'une consommation d'énergie durable et plus respectueuse de l'environnement, il est important d'avoir des systèmes de chauffage alternatifs qui remplissent ces objectifs. Nous nous sommes donc demandé quelle était aujourd'hui la place du bois énergie dans les systèmes de chauffage.

Dans ce dossier, nous allons effectuer une partie théorique sur le chauffage au bois, son utilisation et sa filière, expliquer ce qu'est un réseau de chaleur et établir un compte rendu des visites des chaufferies bois du quartier Grammont à Rouen (76000) et de Maromme (76150), puis nous comparerons l'utilisation du bois pour se chauffer aux autres sources d'énergie plus usuelles mais pas toujours renouvelables pour déterminer s'il peut être une alternative viable et jouer un rôle dans la transition énergétique à venir.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Dès le début, nous avons établi des moyens de communication au sein du groupe afin de faciliter le partage de notre travail. Nous avons créé un groupe Facebook ainsi qu'un dossier sur Google Drive qui nous permet de stocker nos recherches et nos rédactions.

Nous avons commencé chaque séance par un débriefing rapide sur le travail personnel de chacun. La confrontation de nos idées nous a permis de définir la problématique et le plan de notre dossier. A la fin de chaque séance, nous rédigeons un compte-rendu de la séance et nous définissons les objectifs de la séance suivante.

Comme le travail de recherches sur notre partie théorique était réparti entre tous les membres du groupe, cela nous a permis de travailler de manière autonome en dehors des créneaux accordés au projet de physique.

Voici le déroulement de notre projet :

- La première séance nous a permis de découvrir et définir le sujet, ainsi que de partager nos connaissances sur le bois énergie. Grâce à un questionnaire fourni par le professeur, nous nous sommes répartis des recherches à effectuer pour mieux connaître le sujet.

- Pendant la deuxième séance, nous avons déterminé les axes de recherche et cherché des contacts avec des entreprises dans le milieu du bois-énergie.
- La troisième et la quatrième séance ont été dédiées aux recherches et à la prise de contact avec les trois entreprises que nous avons sélectionnées : la chaufferie de Grammont, celle de Maromme et celle de Grand-Couronne. Nous avons écrit plusieurs mails et fait plusieurs appels téléphoniques aux responsables. Nous nous sommes rendus compte que la prise de contact par mail et par téléphone est difficile, c'est pourquoi nous nous sommes directement rendus sur les sites afin de convenir d'un rendez-vous. Nous avons alors réussi à fixer une date pour une première visite à la chaufferie de Grammont.
- La cinquième séance nous a permis d'établir un questionnaire pour la visite à venir, prévue pour le 26 mars. Nous avons également déterminé le plan de notre dossier et nous nous sommes répartis la rédaction de chaque partie.
- Lors de la séance six, nous avons étudié la documentation rapportée par Maëlys du salon de Bois Energie qui s'est tenu à Nantes le 21 mars.
- A partir de la séance sept, nous avons avancé sur la rédaction du dossier ainsi que fait les comptes-rendus sur les visites. En effet, nous avons réussi à obtenir un autre rendez-vous à la chaufferie de Maromme pour le 11 mai.
- La séance onze était entièrement dédiée à la réalisation du diaporama de notre soutenance, la rédaction du dossier étant terminée.
- La dernière séance nous a permis de revoir avec le professeur l'ensemble de notre dossier et de notre diaporama, et de préparer notre soutenance à venir.

Répartition du travail :

Comme nous l'avons dit plus haut, les recherches théoriques et la rédaction ont été divisées de manière équitable au sein du groupe. En ce qui concerne les visites des chaufferies, chacun est venu selon sa disponibilité ainsi le groupe n'était pas au complet à chaque visite, mais nous étions suffisamment nombreux pour faire un compte-rendu complet et réexpliquer ce que nous avons appris aux absents.

3. LE BOIS ENERGIE, UNE ENERGIE A FORT POTENTIEL

3.1. Définition du bois énergie

3.1.1. *Bois, énergie renouvelable*

Le bois

Le bois, tissu végétal, est le principal type de biomasse. Il est en grande partie composé de carbone (50-55%) et d'oxygène (35-40%). On retrouve aussi de l'hydrogène, de l'azote et des minéraux en plus petite quantité. Le bois est utilisé comme combustible. La chaleur que sa combustion génère est utilisée pour le chauffage à échelle domestique et industrielle.

Energie renouvelable

Le bois représente 46% des énergies renouvelables en France, et se place donc en première place des énergies renouvelables de notre pays. Le bois énergie est en expansion, le Grenelle de l'environnement prévoit une multiplication par cinq de la consommation de biomasse. Cette consommation passerait de 1400 ktep (kilotonne équivalent pétrole) en 2006 à 7600 ktep en 2020 dans les secteurs collectif et industriel.

Les énergies renouvelables sont des énergies primaires qui ont un impact environnemental faible. Ces énergies sont supposées inépuisables, on les appelle aussi énergies « flux », contrairement aux énergies fossiles, qui sont des énergies « stock ». La combustion du bois n'a aucun impact sur les émissions à effet de serre. Un équilibre théorique a lieu entre le CO₂ absorbé par les arbres lors de leur croissance et celui rejeté par leur combustion. Pour se développer, les arbres consomment une grande quantité de CO₂. Ils rejettent ensuite du O₂ par un processus bioénergétique appelé photosynthèse (voir en annexe le schéma du cycle).

Bien que la combustion du bois ne soit pas polluante en elle-même, les étapes de broyage et de déchiquetage du bois sont consommatrices d'énergie. Cette consommation reste tout de même faible face à l'énergie obtenue par la combustion. Le transport du bois peut lui aussi générer de la pollution, c'est pourquoi il est nécessaire, en théorie, que la distance entre le lieu de production du bois et le lieu où il est brûlé soit de moins de 50km, c'est ce qu'on appelle un circuit court. Cette faible distance contribue par ailleurs à créer des emplois locaux. De plus, contrairement à ce que l'on pourrait penser, se chauffer au bois participe à la préservation de la forêt. En effet, le bois coupé est ensuite remplacé par une nouvelle pousse. Cependant, le matériel utilisé doit être performant et compatible avec les règles en vigueur afin que la combustion du bois soit complète. En effet, c'est une combustion incomplète du bois qui génère de la pollution (voir plus loin).

Le secteur domestique apparaît alors bien moins performant que le secteur industriel qui lui est plus surveillé et mieux équipé. C'est afin de guider au mieux les particuliers dans l'achat de leurs appareils de chauffage qu'une charte qualité : « Flamme Verte », a été créée par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie : opérateur de l'État pour accompagner la transition écologique et énergétique). Ce label répertorie l'ensemble des appareils de chauffage au bois qui sont performants sur le plan énergétique et environnemental (rendement de 70%). En outre, les

particuliers utilisent souvent du combustible de mauvaise qualité, ce qui contribue à émettre encore plus de polluants atmosphériques.

1. Combustion du bois

Les étapes

Pour qu'il y ait combustion, il est nécessaire d'avoir en présence un combustible (ici le bois), un comburant (souvent l'air contenant du O₂) et une énergie d'activation. Ce n'est pas véritablement le bois qui brûle, mais les produits issus de sa décomposition. En effet, la combustion du bois se déroule selon 3 étapes qui sont : le séchage, le dégazage et la combustion des braises.

Dans un premier temps, l'eau contenue dans le bois va donc s'évaporer lorsque le bois est chauffé à une température de 100°C. En effet, bien que le bois paraisse sec, il contient encore un certain taux d'humidité (entre 15 et 20%). Cette première étape est consommatrice d'énergie. A partir de 200°C, a lieu le dégazage. C'est ce qu'on appelle aussi la pyrolyse, une décomposition thermique dans une atmosphère pauvre en oxygène (voir en annexe le tableau des sous-produits de la pyrolyse en fonction de la température). Cette étape correspond à la libération de certains gaz qui s'enflamment lorsqu'on atteint une température voisine de 300°C, ce qui crée de longues flammes jaunes de diffusion. Enfin, lorsqu'on a dépassé les 800°C, la combustion des braises a lieu. Le bois est transformé en charbon de bois. Ce charbon brûle lui aussi mais ne crée quasiment pas de flammes. Quand il devient incandescent, c'est qu'il s'est transformé en braises. En fin de combustion, on ne retrouve que des cendres qui correspondent à 1% de la masse de départ.

Combustion complète et incomplète

La combustion complète du bois, correspond globalement aux différentes étapes décrites précédemment. Elle permet d'obtenir un maximum d'énergie. Elle se réalise donc dans des conditions optimales, c'est-à-dire avec une quantité neutre de comburant (ni trop, ni pas assez) et en utilisant un bois parfaitement sec, c'est ce que l'on nomme une combustion « neutre ».

Cependant, les conditions d'une combustion complète sont très difficiles à obtenir et l'on observe plus couramment une combustion dite « incomplète ». Elle est généralement causée par un bois trop humide et/ou un mauvais équipement. Elle entraîne l'émission de substances polluantes telles que : le méthane, des composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), ainsi que des particules fines.

3.1.2. Les émissions

Les rejets

Comme on a pu le voir précédemment, en pratique, des substances sont relâchées dans l'environnement lors de la combustion du bois. La nature et la quantité des substances émises peuvent varier selon le type d'équipement, le type de bois et son taux d'humidité.

Du point de vu législatif, selon l'arrêté du 24 septembre 2013, en France, les limites des émissions selon des polluants pour une puissance supérieure à 10 MW sont les suivantes :

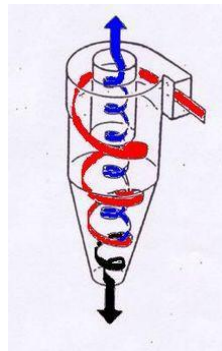
- Oxydes de soufre en équivalent SO_2 : 225 mg/Nm^3
- Oxydes d'azote en équivalent NO_2 : 525 mg/Nm^3
- Poussières : 50 mg/Nm^3
- Monoxyde de carbone : 250 mg/Nm^3

Mesures données en mg/Nm^3 qui est l'unité dans les conditions standards (0°C et 1013 mbar).

Les filtres

Afin de limiter les rejets polluants dans l'atmosphère, les différents appareils de combustion sont équipés de filtres qui purifient en partie les fumées. Il en existe de trois sortes, qui sont plus ou moins efficaces : les filtres cyclones, les électrofiltres et les filtres à manche.

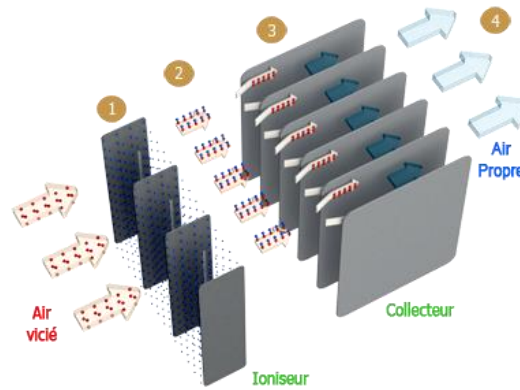
Les filtres cyclones, ou multicyclones, sont les plus répandus en France. Ils respectent les normes en vigueur pour les puissances inférieures à 20 MW et permettent de limiter les émissions de poussières à environ 150 mg/m^3 . Ils fonctionnent selon le principe de la force centrifuge.



Filtre cyclone d'après le site Wikipédia

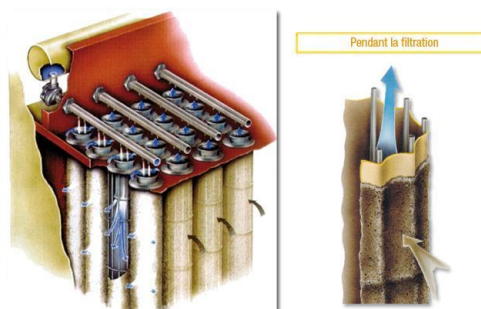
Les électrofiltres, ou filtres électrostatiques, permettent quant à eux de capturer plus de poussières. Les émissions sont réduites à environ 50 mg/m^3 . Les fumées de la combustion passent entre deux électrodes, ce qui permet d'ioniser les molécules. Les particules sont ensuite attirées par une plaque réceptrice puis récupérées.

Ces deux derniers types de filtres peuvent être combinés afin d'abaisser le niveau d'émission autour de 10 mg/m^3 .



Fonctionnement électrofiltre d'après le site asair-ventilation.fr

Pour finir, avec les filtres à manche, les fumées sont aspirées à travers des manches en tissus qui retiennent une partie des poussières. Les émissions varient de 5 à 1 mg/m³ selon que l'on utilise un filtre en céramique ou non.



Filtre à manches d'après le site schmid-energy.ch

L'impact sanitaire

Les études portant sur l'impact de la combustion du bois sur la santé sont peu nombreuses et limitées. Les risques pour la santé sont avant tout liés aux fumées qu'elle rejette dans l'atmosphère. Il a été prouvé que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ainsi que les particules fines présents dans les fumées sont cancérigènes pour l'être humain. Les particules fines sont d'autant plus néfastes pour l'Homme que leur taille particulièrement faible leur confère la possibilité de pénétrer plus profondément dans le système respiratoire.

Le Canada s'est particulièrement intéressé à ce problème. Une étude a été réalisée en 2007 dans le but d'observer les effets des PM_{2,5} (particules fines de taille inférieure à 2.5 µm) sur la population de l'île de Montréal au cours de l'année 2002. Il a été montré que les enfants et les personnes âgées étaient plus vulnérables à ces particules que le reste de la population. Elles aggravent les symptômes des maladies respiratoires (voir en annexe le tableau regroupant l'ensemble des effets des différentes substances présentes dans les fumées). Bien que les fumées ne soient pas les seules sources de particules fines, il est important de souligner que d'après l'Organisation Mondiale de la Santé, les particules fines sont responsables de 42000 décès par an en France.

Nous l’aurons compris, le bois est une énergie propre et renouvelable si sa combustion s’effectue dans des conditions optimales. Le défi des années à venir en ce qui concerne le bois-énergie, est donc de réduire le plus possible les émissions de particules fines dans l’air. Selon l’ADEME, des réductions sont possibles dans le secteur domestique puisque les anciens équipements sont progressivement remplacés par de nouveaux plus performants.

3.2. Nos ressources de bois et l'exploitation

Le territoire français regorge de forêts. La France s’est fixé des objectifs en matière de développement d’énergie à partir de biomasse dans le but de réduire sa dépendance aux énergies fossiles. Le but est de donner une place plus importante aux énergies renouvelables dans l’énergie française soit 40% de l’énergie en France.

Ainsi, pour atteindre ces objectifs, la France se doit de gérer ses ressources en biomasse, c’est à dire le bois et les déchets de bois. La mobilisation de ce bois doit donc s’accélérer, en concertation avec les propriétaires forestiers, en majorité privés, et les collectivités territoriales.

Voyons donc quelles sont les ressources disponibles en bois énergie en France mais aussi à l’étranger afin de comparer les différentes façons d’exploiter les forêts selon le pays.

La ressource en bois du continent européen (hors Russie, Ukraine et Biélorussie) est de 25 000 Mm³ de bois sur pied. Au sein de l’Union européenne, elle se répartit pour 90 % du volume entre six pays : Allemagne, France et Suède (3 000 Mm³ chacune), Finlande (2 000 M m³), Autriche et Italie (plus de 1 000 M m³ chacune). La France fait donc incontestablement partie des pays européens dont le potentiel pour l’industrie du bois est le plus élevé.

Avec un taux de boisement de 28 %, la France se situe dans la moyenne européenne, à peu près au même niveau que l’Allemagne, mais très en deçà de la Finlande et de la Suède (plus de 65 %), ou de l’Autriche (un peu moins de 50 %), pour ne citer que les grands pays exportateurs de bois de l’Union européenne. Mais à l’échelle des bassins d’approvisionnement des grandes industries du bois, le taux de boisement du quart nord-est de la France et de certaines zones du Massif central est compris entre 30 et 55 %, et celui du massif aquitain entre 40 et 65 %. La grande diagonale forestière française qui va des Vosges à l’Aquitaine fait partie des zones européennes a priori intéressantes pour l’implantation d’industries du bois compétitives.

Avec 4 millions de propriétés forestières, la France compte 52 % des effectifs de l’Union européenne, secteurs public et privé inclus, ce qui rend difficile l’organisation d’une offre structurée. Néanmoins seulement 213 000 propriétés (dont 202 000 privées) possédant chacune au moins 10 ha de forêts pèsent ensemble 10,1 Mha. En se limitant aux propriétés de plus de 50 hectares, la France compte 7,3 Mha de forêts, l’Allemagne 7,7 Mha, la Finlande 6,2 Mha, mais la Suède 19,3 Mha.

Un propriétaire n’est pas nécessairement un vendeur régulier de bois, intégré dans une logique économique d’approvisionnement sécurisé des industries. La situation française est très différente de celle de la Suède, de la Finlande ou même du Portugal, où respectivement 37 %, 8 % et 7 % des forêts sont sous le contrôle direct de grands groupes industriels. En France, les quelques études sociologiques disponibles montrent toute l’importance de la dimension patrimoniale de la

propriété dans les décisions de gestion, confortée d'ailleurs par une fiscalité privilégiant la conservation du patrimoine.

Voyons les ressources mondiales en bois pour avoir une idée de ce que représente le bois en France. Le bois demeure un produit essentiel qui se récolte, s'échange et s'utilise partout dans le monde. Ainsi, en 2000, la récolte mondiale a été de 1 765 millions de m³ (Mm³) de bois de feu et 1585 Mm³ de bois ronds industriels. L'usage comme combustible reste prépondérant sur le continent africain et en Asie (80 %), il est minoritaire en Europe et en Amérique du Nord.

3.3. L'industrie du bois

3.3.1. *Définition filière bois énergie*

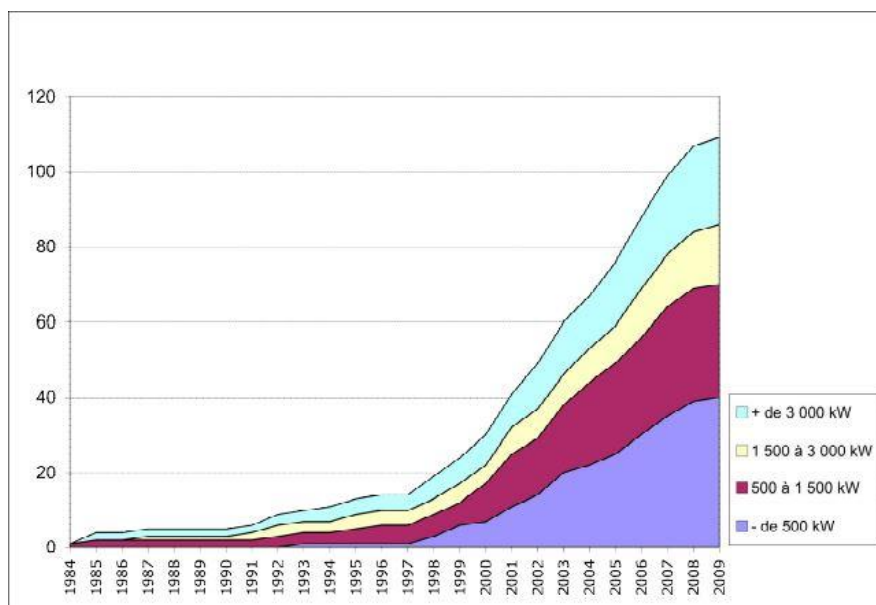
La filière du bois est une macro filière comprenant tous les acteurs qui participent à cultiver, couper, transporter, transformer, commercialiser et recycler ou détruire le bois.

La filière bois énergie est une sous filière de la filière du bois. Elle appartient aux énergies renouvelables qui utilisent la biomasse pour produire de la chaleur, de l'électricité ou des deux simultanément par cogénération.

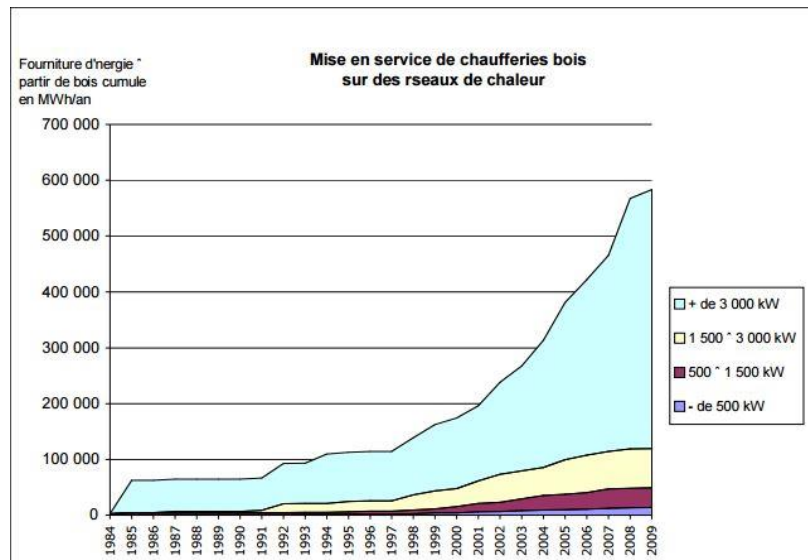
La filière bois de chauffage valorise les bois de chablis, les bois de qualité moyenne, voire des bois qui peuvent avoir d'autres usages quand la demande est forte. Elle fait principalement appel aux bois issus de l'entretien de la forêt, des rebus de l'industrie du bois voire même des déchets forestiers.

En France, c'est une filière relativement « jeune ». Le développement des chaufferies au bois est récent car s'il a débuté dans les années 1980, son décollage s'est fait réellement dans les années 2000 grâce aux plans « bois énergie » successifs de l'ADEME. Cet essor se poursuit depuis 2009 grâce à la mise en place des « Fonds Chaleur renouvelable » issus du Grenelle de l'environnement.

3.3.2. *Production d'énergie*



Evolution du nombre de chaufferies bois en service sur des réseaux de chaleur (Les réseaux de chaleur au bois Rapport d'enquête réalisé en 2009 - CIBE)



Évolution de la fourniture d'énergie par les chaufferies bois sur des réseaux de chaleur (Les réseaux de chaleur au bois Rapport d'enquête réalisé en 2009 - CIBE)

Le bois représente la première source en énergie renouvelable en France et sa production d'énergie se voit en hausse continue depuis 10 ans. Néanmoins, en ce qui concerne la production d'électricité, il n'occupe que la troisième place, selon les chiffres d'EDF. Cette faible génération d'électricité peut être expliquée par le fait qu'avec des centrales nucléaires, on ne fait que rarement de la cogénération. En plus, les installations de cogénération fonctionnent à 90% à gaz, Les cogénérations avec du charbon ou de la biomasse restent relativement marginales. En effet, la France est en retard par rapport aux pays voisins dans la cogénération d'énergie à partir du bois. 3 % de l'électricité est issue de cogénération dont une partie seulement qui provient de la biomasse. En Europe, 11 % de la production électrique sont assurés par la cogénération alors que les pays leader dans la matière ont un pourcentage bien supérieur : 43% pour le Danemark, 41 % pour la Lettonie, 34% pour la Finlande et 30 % pour les Pays-Bas.

De la même manière, la France figure parmi les pays qui possèdent le moins de réseaux de chaleur : en 2009, il n'y avait que de 149 réseaux de chaleur équipé d'une chaufferie au bois en France, selon une enquête de la CIBE.

3.3.3. Impacts sociaux : création d'emploi

La filière bois énergie génère des activités de proximité et est créatrice d'emploi pour la production du combustible, l'approvisionnement et l'exploitation des chaufferies. Selon des estimations divergentes, le bois énergie nécessite 3 fois plus de main d'œuvre que les autres énergies.

Une chaufferie permet de créer des emplois durables à temps plein qui correspondent aux tâches suivantes :

- La récolte, collecte, tri et transport des produits et sous-produits ligneux ;

- Le conditionnement du bois, stockage et approvisionnement de la chaufferie ;
- L'exploitation de la chaufferie.

Selon les chiffres de CIBE (Comité Interpersonnel du Bois Energie) en 2013, la filière forêt - bois en France représente 440 000 emplois.

La dimension sociale est mise en avant par les promoteurs de la filière. Cependant, les coûts d'exploitation et notamment la main d'œuvre constituent un handicap pour le bois énergie s'ils ne sont pas compensés par des subventions de l'Etat ou des avantages fiscaux.

3.4. Utilisation et consommation du bois énergie (domestique et industrielle)

En France, la consommation de bois-énergie est d'environ 40 millions de m³ de bois par an, soit 9 millions de tonnes équivalent pétrole.

La consommation pour le secteur domestique, qui consiste au chauffage des habitations, représente 84% de la production de chaleur totale de la filière. La consommation a légèrement augmenté au cours des 30 dernières années, mais c'est surtout la façon dont le bois est utilisé qui a changé. Les cuisinières et chaufferies individuelles ont été remplacées par des inserts, des foyers fermés ou des poêles, qui servent principalement de chauffage d'appoint, mais qui peuvent aussi être utilisés comme chauffage central.

En 2006, le secteur industriel a représenté la totalité de la production d'électricité à partir du bois, mais seulement 13% de la chaleur. La quantité d'électricité et de chaleur produites ont tout de même augmenté depuis les années 1970, puisqu'elle est passée de 700 GWh à 1400 GWh pour l'électricité, et de 800 ktep (tonnes équivalent pétrole) à 1000 ktep pour la production de chaleur.

Le secteur collectif et tertiaire, lui, comprend le chauffage collectif grâce à des chaudières à bois, qu'il y ait ou non un réseau de chaleur. Cette chaleur est utilisée pour les habitats tels que les résidences et les HLM, mais aussi pour les bâtiments du tertiaire tels que les hôpitaux, les écoles ou encore les bâtiments administratifs. Ce secteur représente seulement 2,4% de la production de chaleur à partir du bois, mais il augmente de 13% par an depuis 2000.

Le bois consommé provient de sources différentes ...

Pour le secteur domestique, le bois provient en grande majorité de l'auto-alimentation, avec 25 millions de stères par an. 5,4 millions de stères par an proviennent d'agriculteurs ou de paysans habitant à proximité des consommateurs, tandis que les circuits professionnels représentent 6 millions de stères par an. On remarque donc que le bois est principalement une ressource de proximité, les distances de transport étant réduites pour l'auto-alimentation et le circuit court. En France, l'exploitation des ressources de bois est inférieure à la production des forêts. En 2003, la récolte a été de 52 millions de m³, tandis que la production biologique était de 103 millions de m³.

... et se trouve sous différentes formes.

Le bois de chauffage peut être utilisé sous différentes formes. Tout d'abord, le bois est plus souvent utilisé sous forme de bûches. Le pouvoir calorifique varie peu selon les essences, il est très légèrement supérieur pour les résineux comparé aux feuillus. Ce qui va surtout influencer le pouvoir calorifique du bois est son taux d'humidité. Plus celui-ci est bas, plus le rendement sera élevé. En effet, si le taux d'humidité est de 65%, la production sera de 1500kWh/tonne, tandis qu'à un taux d'humidité de 40%, celui-ci passe à 3000kWh/t.

Le bois peut être utilisé sous forme de granulés, aussi appelés pellets. Ceux-ci sont issus du compactage des sciures. La densité énergétique des granulés est plus élevée que pour les bûches traditionnelles, ce qui rend leur stockage plus facile. Le principal avantage de ce combustible est qu'il permet d'utiliser un poêle ou une chaudière automatique grâce à une alimentation mécanisée.

Les équipements : leurs rendements et leurs fonctionnements

A échelle domestique, les équipements permettant de produire de la chaleur à partir de la ressource bois prennent différentes formes, avec des rendements et des autonomies différentes :

- le foyer ouvert (la cheminée) : rendement de l'ordre de 10%,
- le foyer fermé et l'insert : rendement allant de 70% à 85% pour des appareils récents,
- les poêles : rendement de 70% à 85% pour des appareils récents,
- les chaudières : rendement de 70% à 95%.

Le rendement est le rapport entre le pouvoir calorifique du bois et l'énergie qui en est retirée sous forme de chaleur.

Les cheminées, qu'elles soient à foyer ouvert ou fermé, utilisent le principe de chauffage par convection. La convection est un mode de chauffage qui repose sur le mouvement de la matière. Ici, l'air est prélevé là où il est le plus froid : au niveau du sol il est chauffé, ce qui le rend moins dense et lui permet de s'élever, diffusant sa chaleur dans toute la pièce. Lorsque l'air refroidit, il redevient plus dense et redescend, ce qui crée une boucle de convection. En plus du chauffage par convection, les cheminées utilisent aussi le transfert radiatif. Les vitres laissent passer un rayonnement infrarouge puissant qui réchauffe, cette chaleur pouvant être ressentie même si l'on se tient loin de la source. Les poêles utilisent le même mode de fonctionnement que les cheminées, seul l'habillage diffère.

3.5. Fonctionnement d'un réseau de chaleur

3.5.1. Fonctionnement d'une chaudière

Un réseau de chaleur se constitue d'une ou plusieurs chaudières et d'un réseau de canalisations permettant de véhiculer l'eau chaude et récupérer l'eau froide.

Intéressons-nous tout d'abord au fonctionnement d'une chaudière. Ici, nous prendrons l'exemple de la chaufferie Grammont. Nous ajouterons également les particularités de la chaufferie de Maromme qui présente plus d'options.

Le combustible (sous forme de plaquette, copeau, granulé de bois) est acheminé vers un espace de stockage appelé silo. Ce dernier comporte des râteliers munis de vérins hydrauliques qui permettent de déposer à intervalles de temps réguliers le combustible sur un transporteur à chaîne (qui peut être représenté par un tapis roulant métallique). Le bois arrive alors à une trémie qui va gérer le flux de combustible à l'aide d'un clapet de fermeture. Dans le cas d'une introduction, le clapet s'ouvre et un vérin pousse un certain volume de bois dans le foyer.

Dans le cas de la chaufferie Grammont, le foyer est divisé en trois parties. Le tiers supérieur est destiné au séchage du bois où la température de 250 °C permet de brûler un combustible avec un taux d'humidité élevé. Les deux autres tiers inférieurs sont destinés à la combustion du bois où la température avoisine les 1100 °C. Le foyer comporte plusieurs grilles pouvant translater horizontalement. Celles-ci permettent de faire tomber le bois préalablement séché vers les parties inférieures de manière à brûler un bois « sec ». Un tel système permet donc de brûler du bois avec un grand taux d'humidité (pouvant parfois atteindre 60%).

Cette chaudière est également pourvue d'un système de filtration des fumées et des déchets lourds. Lors de la combustion du bois, les fumées passent dans des échangeurs de fumées avant d'arriver dans un dispositif de filtration. Ce dernier est composé d'un premier filtre cyclonique qui va récupérer les particules les plus lourdes. Un deuxième filtre, appelé filtre à manche va filtrer les particules plus fines (composées majoritairement de plomb). Notons qu'un autre type de filtre comme l'électrofiltre peut également être utilisé à la place du filtre à manche. Le ventilateur évacue ensuite les fumées de la chaufferie vers l'extérieur.

Lors de la combustion du bois, la chaleur créée est transmise à un fluide dit « caloporteur » qui va transiter dans des canalisations et arriver aux différentes installations nécessitant du chauffage.

Dans certains cas, la chaufferie présente également un ballon qui admet le stockage d'eau chaude. Cette dernière peut donc ensuite être utilisée dans des cas de forte demande en eau chaude. On appellera ce phénomène hydroaccumulation.

Quelques fois, les chaufferies plus sophistiquées possèdent un condenseur. Ce dispositif, placé en aval de l'électrofiltre, récupère les fumées issues de la combustion qui seront condensées grâce à l'injection de gouttelettes. Les fumées condensées sont ainsi transmises au circuit d'eau à basse température et permettent de préchauffer l'eau à une température inférieure à 50 °C.

Les déchets de la combustion du bois ne sont pas tous récupérés par les différents filtres. Il existe également un dispositif permettant de séparer les cendres. Au fond du foyer, se trouve un volume de 40 cm d'eau. Celui-ci sert à refroidir les cendres qui seront ensuite déposées dans des bennes à cendre (elles pourront ensuite servir de fertilisants et être épandues dans les champs).

Enfin, l'armoire électrique est dotée d'un régulateur qui va permettre de réguler la température de l'eau en fonction de la température extérieure.

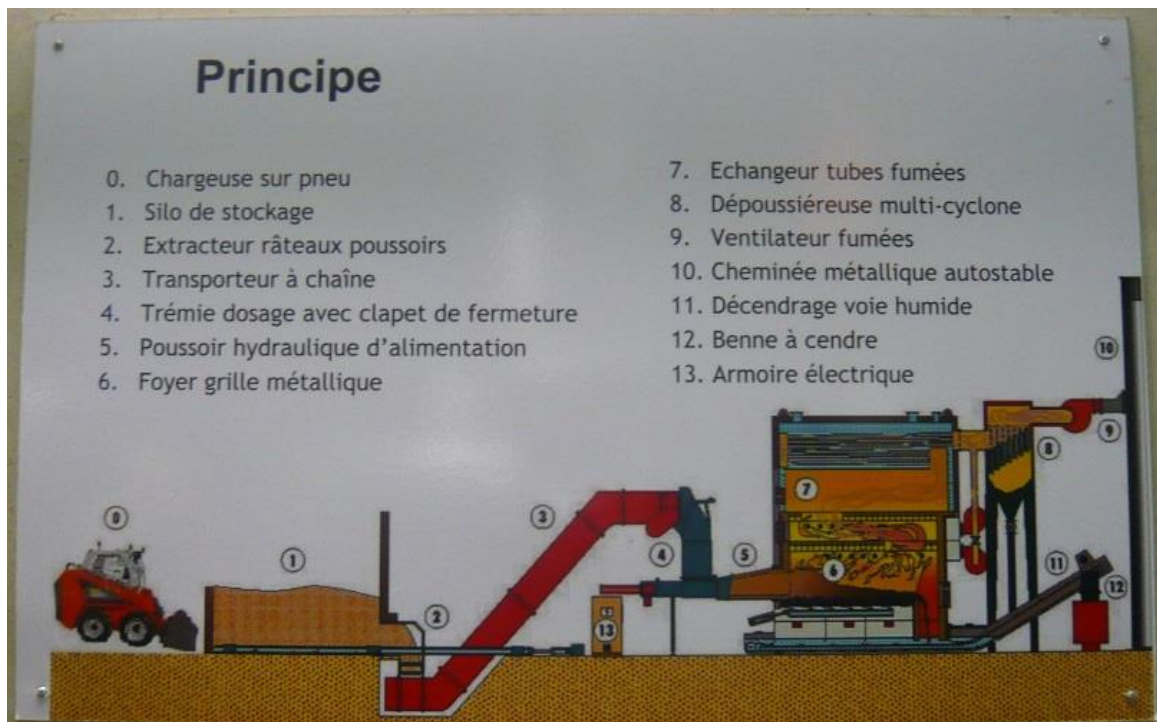


Photo prise à la chaufferie de Grammont

3.5.2. Organisation du réseau de chaleur associé à la chaufferie

Un réseau de chaleur est souvent composé de deux réseaux de distribution. Un premier que l'on appellera primaire où la chaleur produite au niveau de la chaudière est directement envoyée à l'aide d'un fluide caloporteur (sous forme d'eau chaude ou de vapeur d'eau). La chaleur est ensuite transmise à un réseau dit secondaire par le biais d'échangeurs. Cette deuxième forme de distribution permettra donc de transmettre le fluide chaud aux divers bâtiments et infrastructures utilisant ce type de chauffage.

Le réseau de chaleur est un circuit fermé au sens où le fluide présent reste dans les canalisations. En effet, le circuit aller (symbolisé en rouge page suivante) transporte le fluide caloporteur chauffé dans des canalisations. Celles-ci sont connectées aux sous-stations (réseau secondaire) par le biais d'échangeurs. Le fluide chaud est alors utilisé dans les bâtiments puis repart dans le circuit retour (symbolisé en bleu) et regagnera la chaufferie pour être à son tour réchauffé.

Il existe principalement trois types de fluides caloporteurs pour la distribution primaire. Un réseau d'eau chaude avec une température comprise entre 60 °C et 110 °C qui est utilisé par les habitations et autres infrastructures comme des hôpitaux et industries n'utilisant pas de vapeur. L'eau surchauffée à une température de 110 °C à 180 °C est utilisée dans pour des bâtiments nécessitant des températures élevées (industries textiles, laveries, abattoirs...).



Modélisation d'un réseau de chaleur, site internet reseaux-chaleur.cerema.fr

Notons qu'il est important pour un réseau de chaleur, d'avoir une densité thermique élevée de manière à assurer la viabilité économique du projet (en effet, il est important d'avoir un nombre d'utilisateurs suffisant pour bénéficier d'un retour d'investissement convenable). Pour calculer la facture de chaque utilisateur, un compteur de chaleur transférée est présent au niveau des sous-stations et calcule l'énergie consommée par le bâtiment.

4. ETUDE DE CAS : LES RESEaux DE CHALEUR (VISITES DES CHAUFFERIES DE GRAMMONT ET MAROMME)

Le jeudi 26 mars, nous avons visité la chaufferie du quartier Grammont à Rouen. Nous avons été guidé par M. Pascal VORANGER, ingénieur issu de l'Icam à Lille et chef d'exploitation du site et qui gère par ailleurs de nombreux autres sites comme celui du CHU à Rouen. M. Voranger est employé par l'entreprise Dalkia du groupe EDF. La mise en place de la chaufferie Grammont remonte à 2006 et le coût de cette construction s'élevait à 8 millions d'euros. Fort heureusement pour la commune, cet investissement a été en grande partie pris en charge par l'ADEME et par l'État, à hauteur de 40%. Le business plan prévoit l'amortissement de l'investissement sur 20 ans. Le site a ouvert en 2008 remplaçant ainsi 4 anciennes chaufferies.



Chaufferie Grammont (Rouen)

Après cette visite, nous avons pensé qu'il serait intéressant de visiter une autre chaufferie bois afin de comparer leur fonctionnement et d'avoir plusieurs avis de professionnels. Nous avons donc cherché une chaufferie exploitée par les concurrents de Dalkia : c'est la chaufferie de Maromme gérée par Cofely Services, une filiale de GDF Suez. La chaufferie date de janvier 2013 et a coûté 7 millions d'euros (22 millions avec le réseau).



1 : Chaufferie Maromme ; 2 : Canalisations ; 3 : Sous-station

Main d'œuvre

Selon l'ADEME, une chaudière à bois de 5 MW telle que celle du site Grammont doit entraîner la création de cinq emplois : un à la chaufferie, trois au transport et deux au service forestier. Un employé à plein temps travaille de 8h à 17h et une autre personne est d'astreinte la nuit. Ces employés possèdent un Bac pro énergie équipements, un BTS fluides énergies environnements ou encore un BTS électrotechnique.

La chaufferie de Maromme emploie 4 personnes dont un chef, un sous-chef et 2 employés.

Ressources matérielles (matière première et équipement)

Le bois utilisé par la chaufferie Grammont est fourni par une filiale de Dalkia et vient directement des forêts environnantes (dans un rayon de moins de 100 km). Celui-ci n'est ni séché, ni traité. C'est pourquoi son taux d'humidité varie de 25 à 60% avec une moyenne à 35%. Le bois provient des déchets forestiers (branches, souches) autrement dit, tout ce qui n'est pas utilisé par ailleurs dans l'industrie du bois. Les bois brûlés sont de tous types. De fait, aucun tri n'est réalisé à ce niveau.

Le fournisseur de bois de la chaufferie de Maromme est Bio Combustible (qui gère aussi le traitement des cendres). Les responsables des 2 chaufferies nous ont dit que le périmètre théorique de 50 km n'est pas respecté car il n'y a pas assez de bois à proximité.

Actuellement, le prix du bois acheté par la chaufferie de Grammont est de 32€/MWh, sachant que le poids de l'eau présente dans le bois n'est pas pris en compte. Il peut être intéressant de noter que ce prix a augmenté de 30% en un siècle. Ensuite, la chaufferie propose des abonnements à l'année pour les logements desservis par son réseau. Le MWh y est vendu à 29€ HT. Il apparaît alors que l'activité de la chaufferie soit déficitaire. Néanmoins, grâce aux subventions de l'État et à une TVA réduite à 5,5% (contre 20% pour le gaz), des bénéfices sont tirés. A ce propos, le chiffre d'affaire de la chaufferie Grammont s'élève à 1 million d'euros. Ce chiffre est relativement faible si on le compare à des d'autres chaufferies plus importantes telles que celle du CHU, qui engrange quant à elle 12 millions d'euros.

Mais de manière générale, le bois énergie ne se trouve être rentable que par le biais de subventions et par le maintien d'une TVA faible. A titre de comparaison, une chaudière à bois de 5 MW coûte 800 000€, tandis qu'une chaudière à gaz deux fois plus puissante de 10 MW ne coûte que 150 000€ et ne nécessite pas l'emploi d'autant de personnel que pour une chaudière à bois.

Pour en revenir à Grammont, la chaufferie brûle 7 000 tonnes de bois par an. Cela revient à la consommation hebdomadaire d'un chargement d'une douzaine de camions, sachant que chacun de ces derniers peut transporter jusqu'à 90 m³ de déchets forestiers. Les camions déposent les ressources dans un silo et plus précisément dans la partie passive de celui-ci. Le silo a une capacité suffisante pour permettre à la chaufferie de fonctionner en autonomie durant 3 jours.



La chaufferie de Grammont dispose de plusieurs chaudières pour mener à bien sa mission. Tout d'abord, on trouve en guise de chaudière principale, une chaudière à bois d'une puissance de 4,8MW. En cas de panne, le site dispose d'une chaudière de 10MW. Enfin, pour les périodes estivales, c'est une chaudière à gaz de 1,6MW qui prend le relais. En effet, à partir de mi-mai, la chaudière principale est arrêtée pour des raisons techniques et de besoin. Au final, 88% de la chaleur produite par la chaufferie se fait par la combustion du bois, les 12% restant correspondent à la combustion de gaz ou de fioul.

La chaufferie de Maromme est plus grande : elle comporte 2 chaudières d'origine autrichienne (de la marque Agro). La première est de 2500 kW et la deuxième est de 7200 kW. La température du foyer atteint entre 700°C et 1000°C. Ces chaudières permettent de chauffer de l'eau à 200°C dans ce qu'on appelle des "boîtes à eau" de 27000L pour la grande et 7000L pour la petite. La chaufferie comporte aussi 2 chaudières à gaz en cas de besoin (panne ou pic de consommation), elles peuvent fournir au maximum 13000MW. La première est de 8000 MW (si les 80°C ne sont pas atteints avec la chaudière à bois) et la 2ème est de 10 000 MW (en secours si les chaudières bois sont en panne).



Foyer de la chaudière de 7200kW à Maromme

Fonctionnement actuel et perspectives d'avenir

La chaufferie de Grammont présente un fonctionnement pouvant être décrit selon les étapes suivantes :

- Cinq râteaux munis de vérins hydrauliques emmènent les copeaux de bois sur un racleur à chaîne qui va alimenter le brûleur.



- Le bois est introduit dans le brûleur de façon périodique : un vérin recule ouvrant un clapet permettant l'introduction de 200L de bois puis le vérin avance, poussant le bois vers le brûleur. L'introduction du bois se fait toutes les minutes.
- Le brûleur ou foyer dans lequel est introduit le bois est composé de grilles pouvant translater horizontalement pour faire descendre le combustible aux grilles inférieures. Dans un premier temps, le bois ne subit pas de gazéification. Pour cause, le premier tiers du foyer est destiné au séchage du bois. Il y règne une température située aux alentours de 250°C, afin de sécher les bois les plus humides. Les deux derniers tiers sont destinés au « brûlage ». Il y règne une température pouvant atteindre les 1100°C.

- Au fond du foyer, on trouve 40cm d'eau. Ces dernières ont pour but de récupérer les cendres issues de la combustion et de les évacuer vers des bennes à cendres. C'est le « décentrage ». Sur les 7 000 tonnes de bois brûlés sur l'année, 5% donnent des cendres. Parmi ces 5%, 3% sont recyclés en tant qu'engrais épandus dans les champs et 2% sont des déchets « radioactifs » à posteriori enfouis par des filiales spécialisées. Auparavant, ces déchets étaient utilisés pour faire du béton.
- Les fumées résultant de la combustion du bois sont filtrées en deux temps. Un premier filtrage dit « cyclonique » permet de réduire la quantité de poussières et de particules lourdes à ceux dont la masse volumique est inférieure à 150g/m^3 . Un second filtrage dit « à manche » permet au final de ne rejeter que des particules de masse volumique inférieure à 10g/m^3 , sachant que la norme en vigueur est de 50g/m^3 . Les filtrats sont par la suite enfouis par des filiales spécialisées.

La chaufferie de Maromme possède des spécificités en plus que n'a pas celle de Grammont. En effet, son deuxième filtre est de type électromagnétique. Une fois traitées, les fumées à 180°C sont injectées dans un condenseur afin de réchauffer l'eau qui revient du réseau et atteint ainsi la température de 47°C . Cela permet de récupérer 1000kW . On arrive ainsi à récupérer 12% de la puissance par mois.

De plus un système d'hydroaccumulation est en cours d'installation. Ce sont 3 gros ballons d'eau chaude d'une capacité totale de 300 m^3 , c'est un stock d'eau chaude en cas de forte consommation (le matin surtout, quand la demande est plus importante).



La chaleur émise par la combustion du bois à Grammont est utilisée pour chauffer l'eau du circuit fermé constituant le réseau de chaleur de la chaufferie. L'eau est chauffée à environ 100°C ,

avant d'être injecté dans le réseau où elle se trouve à 90°C. Le réseau de la chaufferie est séparé du réseau client. En effet, un échangeur est installé entre le réseau de la chaufferie et celui du client afin que ce dernier ait accès à une puissance correspondant à sa demande. Pour rappel, le client paye un abonnement à l'année de 29€/MWh HT. En comparaison, pour les mêmes besoins, il devrait payer 55€/MWh s'il se chauffait par gaz ou par électricité soit environ le double du prix proposé par un chauffage au bois. En fait, il s'avère que toute personne vivant dans le périmètre de concession de la chaufferie, est obligé d'être raccordé à son réseau et ce pendant 24 ans.

Pour la chaufferie de Maromme, il faudrait brancher plus de monde au réseau afin que la chaufferie soit plus rentable. Il faudrait également que le contrat de 24 ans avec la mairie soit renouvelé au moins une fois.

Pour ce qui est des perspectives d'avenir, la chaufferie Grammont a quelques projets. Tout d'abord, l'installation d'un nouveau moteur cogénération de 1,8MW est prévue pour 2016. En effet, jusqu'à présent, la chaufferie Grammont ne réalisait pas de cogénération car elle n'avait pas l'équipement nécessaire et car ce n'était pas le but de sa création. Mais aujourd'hui, le site souhaiterait pouvoir élargir son secteur d'activité en fournissant de l'électricité pour EDF. Par ailleurs, la chaufferie Grammont souhaiterait raccorder son réseau à un autre fournisseur près de 1200 logements. Cependant le projet risque de ne pas aboutir, en raison d'un manque de puissance actuel et d'une impossibilité d'agrandir ses installations faute de place sur le site.



Explication du fonctionnement de la chaudière à Maromme lors de notre visite.

Clientèle

La chaufferie Grammont compte actuellement 25 clients. Il s'agit de bâtiments publics tels que la clinique Mathilde, l'OPH Rouen habitat, ou encore l'école du quartier. La chaufferie ne fournit aucun particulier. Le réseau desservit équivaut à 1300 logements. Il fait 2,5 km de long, remontant le long de la Rue Henri II Plantagenêt et descendant l'Avenue Grammont.

Quant à Maromme, elle dessert plus de 3000 équivalents logements sur 22km de linéaire réseau.

Avis personnel

D'après les responsables présents sur le site de Maromme, le bois-énergie serait plus un "effet de mode". Les chaufferies en cogénération ne se recréent pas.

Selon M. Voranger, le chef d'exploitation de la chaufferie de Grammont, le futur de la filière bois énergie est incertain. Pour reprendre ces mots, « ça va stagner ». En effet, il apparaît qu'en France, le bois n'est pas suffisamment bien géré et exploité puisque de nombreuses forêts sont privées. Le prix du bois augmente donc. Ainsi le domaine du bois énergie est amené à connaître un avenir peu propice à sa croissance contrairement à il y a une dizaine d'années où ce fut « une folie, une mode » pour reprendre les mots de notre guide. D'ailleurs ce ralentissement se fait déjà sentir aujourd'hui alors que de nombreux projets ne parviennent pas à aboutir, à cause d'une peur de flambée des prix du bois et de la chute des prix du gaz. En fait, il apparaît que la France dénonce un retard par rapport à certains pays de l'Est de l'Europe qui utilisent cette matière première depuis plus de 40 ans.

Cependant, malgré un avenir maussade, la filière bois énergie possède encore à ce jour de nombreux points forts importants.

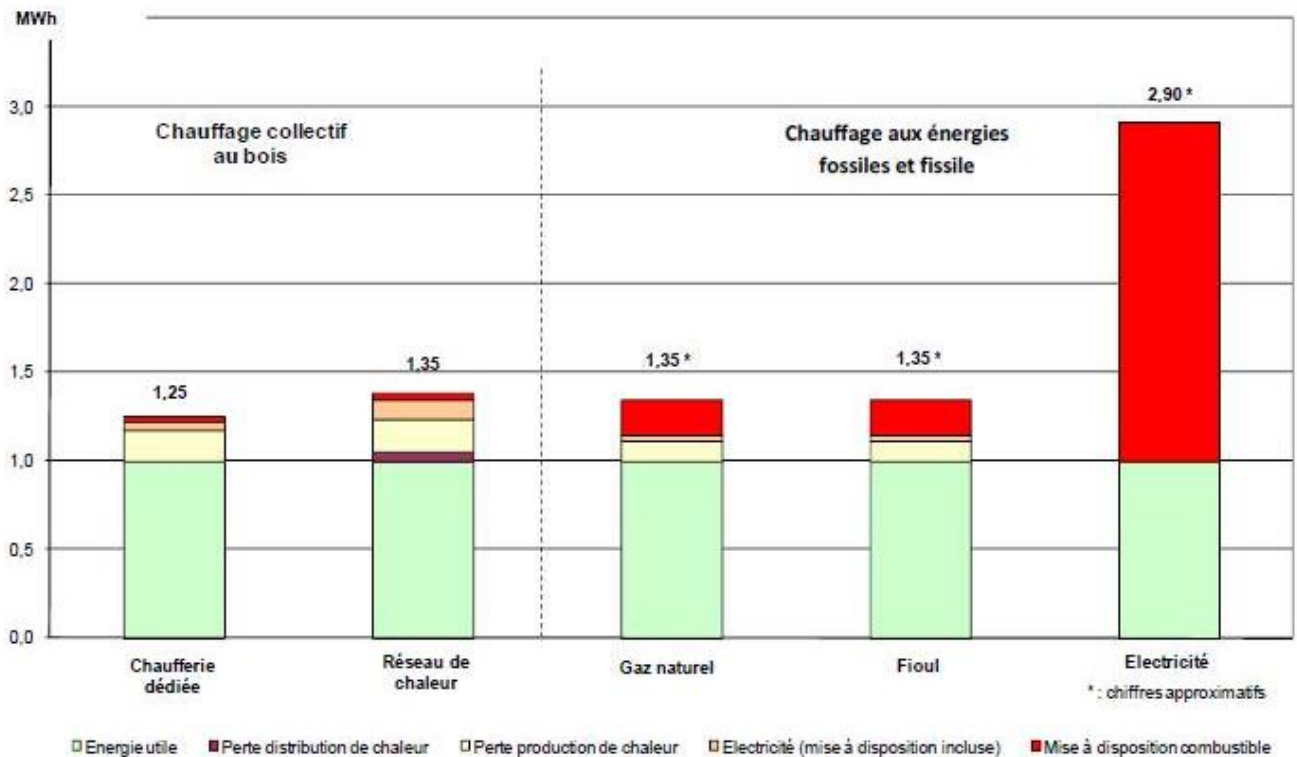
5. LE BOIS ENERGIE DANS LA TRANSITION ENERGETIQUE

5.1. Niveau écologique (rejets en CO₂ et en particules fines)

- Le bois, l'économie des autres sources d'énergie fossiles :

La consommation d'énergie mondiale a été multipliée par 5 en seulement 50 ans. Aujourd'hui, 80 % de cette énergie provient du pétrole, du gaz et du charbon qui sont des énergies fossiles alors que seulement 10 % provient de la biomasse. Selon l'ADEME, les énergies fossiles seront vraisemblablement épuisées dans la seconde moitié du XXIème siècle. L'utilisation du bois permet d'économiser les stocks limités des autres sources fossiles. En effet, 4 tonnes de bois permettraient d'économiser 1 tonne de pétrole.

Figure 4 : Energie nécessaire pour produire 1 MWh utile
(Source Biomasse Normandie et Bio Intelligence Service, extrait du cahier du bois-énergie n°42
édités par le Bois International : Efficacité énergétique du chauffage au bois)



Ce diagramme montre les économies d'énergie qui peuvent être faites grâce à l'utilisation du bois comme chauffage, puisque en effet, 1,25 MWh sont nécessaires pour produire 1 MWh utile avec le bois, contre 2,9 MWh pour l'électricité par exemple.

- La valorisation énergétique des sous-produits de la filière bois

L'utilisation du bois de chauffage contribue aussi à l'entretien des forêts. En effet, même si en France, les espaces forestiers couvrent environ un tiers du territoire, ils sont parfois laissés à l'abandon et sont donc plus susceptibles d'être endommagés par des intempéries ou des incendies. L'élimination des résidus permet d'améliorer l'état sanitaire des espaces boisés et favorise la repousse de jeune bois qui consommeront beaucoup de CO₂ présent dans l'air.

- Plus respectueux de l'environnement que les sources d'énergies fossiles.

Au-delà de la théorie du bilan carbone neutre, des études ont montré que l'ensemble des activités relatives au chauffage au bois ne rejetterait "que" 40kg de CO₂ par MWh de chaleur utile alors que les chaufferies au gaz, au fioul et à l'électricité émettraient respectivement 222kg, 480kg et 180kg de CO₂ par MWh. Soit 12 fois moins de gaz à effet de serre émis pour le bois énergie, en comparaison avec le fioul par exemple.

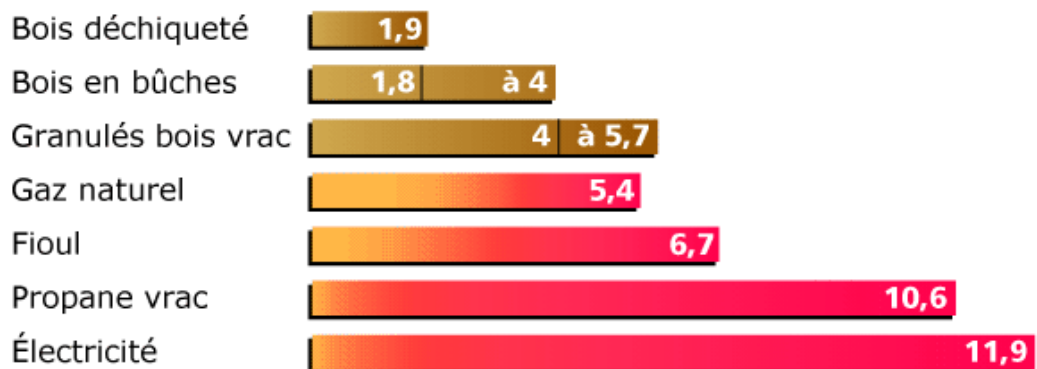
5.2. Niveau économique (prix, TVA...)

Le coût du chauffage au bois

Se chauffer au bois nécessite des installations importantes et donc un investissement initial. Il est de 500 à 1500 € pour les poêles, inserts et foyers fermés et les chaudières non automatiques et de 2 000 à 3 000 € pour les chaudières automatiques. Pour le secteur industriel, les visites nous ont appris qu'une chaudière à bois coûtait plus de cinq fois le prix d'une chaudière à gaz pour une puissance moindre. Mais même si l'investissement de départ est important, le retour sur investissement lui, sera rapide et les bénéfices à long terme ne seront pas négligeables.

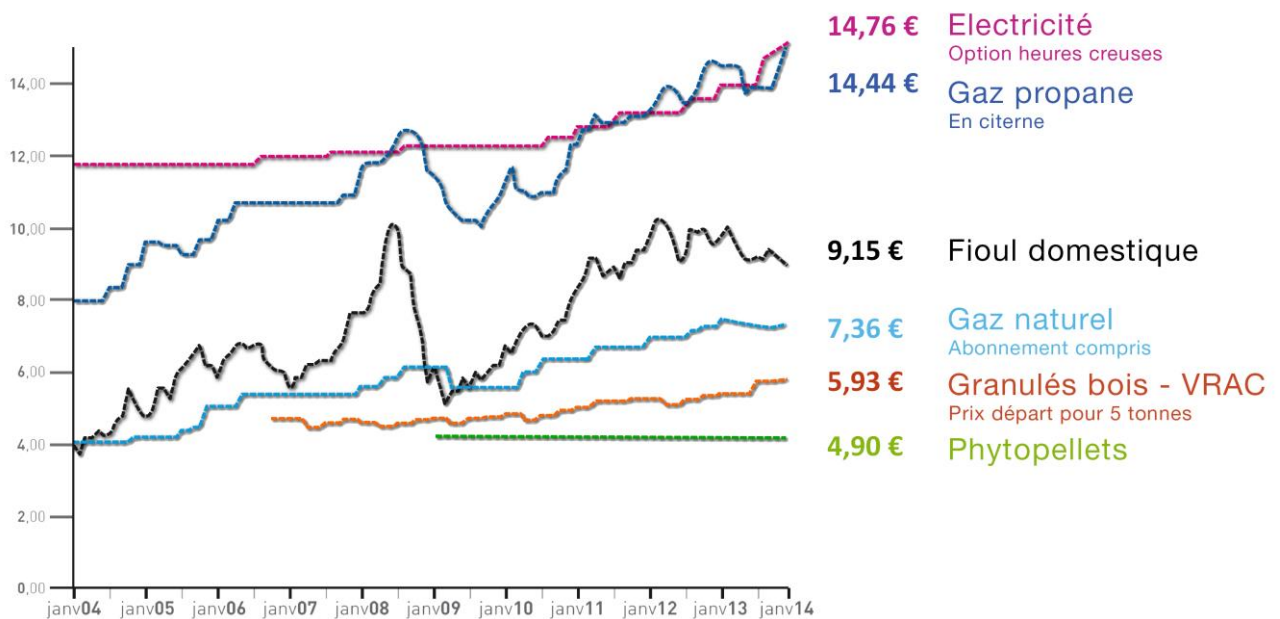
Mais ces installations impliquent aussi un entretien annuel obligatoire fait par une personne qualifiée. Les coûts d'entretien peuvent s'élever à un montant de 50 à 190 €/an. Bien évidemment, pour promouvoir l'utilisation du chauffage au bois, différents types d'aide financière peuvent être apportés comme le crédit d'impôts développement durable, l'éco-prêt à taux zéro ou encore la Prime rénovation énergétique de 1350€.

- Une nette différence économique entre le bois énergie et les sources d'énergie fossiles



Légende 2ème image : Réalisé par l'association AJENA, cet argus énergétique de janvier 2012 permet de mettre en avant la compétitivité des bois énergies par rapport aux autres types d'énergies (prix en € ttc/kWh avec prise en compte du rendement moyen des équipements).

Il y a en effet une certaine différence de prix en les combustibles bois (plaquettes, bûches, granulés) et les autres. Les chiffres parlent d'eux-mêmes, le prix des bûches ou des plaquettes représente moins du quart que le prix du chauffage électrique par exemple.



D'après ce graphique, on observe que les sources d'énergie non renouvelables et pourtant largement utilisées comme l'électricité, le gaz propane ou encore le fioul, sont soumises à d'importantes fluctuations, imprévisibles selon l'orientation du marché, et à une importante hausse de leur prix au cours de ces dernières années. Entre 2009 et 2013, on a observé une augmentation de 58% du prix du fioul, et une de 31% pour celui du gaz naturel. Le bois est en revanche la source d'énergie la moins chère, son prix est constant, stable et n'a pas observé d'augmentation significative.

Une maison de 150 m², avec chauffage et eau chaude électrique, consomme en moyenne 20 000 kWh/an. Pour se donner une idée, 18 000 kWh = 1600 L de fioul = 4 tonnes de granulés.

Témoignages :

Nous avons trouvés différents témoignages de personnes qui ont réalisé les travaux nécessaires pour faire une transition énergétique vers le chauffage au bois :

- Jacques Bremond, Garage Peugeot à Doué la Fontaine (49) « En septembre 2011, nous avons réalisés d'importants travaux dans le garage avec l'installation d'une chaudière à granulés. Nous sommes passés de 120m² chauffés au fioul à 1600m² chauffés aux granulés (bureaux + ateliers). La surface a été multipliée par 13 alors que la facture d'énergie n'a augmenté que d'un quart (4000euros/an contre 3000euros), l'économie est sans appel »
- Alain Morlière, particulier Massogne (86) « En 2005, ma maison secondaire est devenue ma résidence principale. Cette maison ancienne de 300m² était chauffée jusqu'à présent au gaz propane. J'ai envisagé une autre solution, l'installation d'une chaudière à granulés avec un silo. Pour chauffer mes 300m², j'ai besoin de 10 tonnes de granulés par an. En 2007, les aides régionales et nationales étaient conséquentes : en comparaison avec le gaz, mon investissement de départ a été rentabilisé au bout de 3 ans. »

5.3. Politique et gestion

Dans l'optique d'atteindre les objectifs de réduction de la consommation des énergies fossiles et des émissions de gaz à effet de serre, prévus pour 2030, l'état favorise largement l'utilisation du bois comme source de chaleur. En effet, les subventions, les aides financières mises en place (vues paragraphe précédent) pour les particuliers ainsi que pour les professionnels, et le maintien d'une faible TVA sur le bois permettent au chauffage au bois de rester rentable face aux autres moyens pour se chauffer. Pour les sources d'énergie fossiles il n'existe pas d'aide particulière et la TVA peut par exemple s'élever à 20% sur le gaz (contre 5.5% pour le bois bûche). L'objectif est aussi de faire la promotion du bois énergie en France qui s'avère être très en retard à ce niveau en comparaison à d'autres pays d'Europe et qui devra faire face à leur concurrence sur le marché.

La gestion d'un chauffage au bois et peut-être l'inconvénient le plus important. Pour les particuliers, l'entretien et les installations peuvent être coûteux, lourds et parfois encombrants. La livraison et l'achat du bois sont contraignants...Se chauffer au bois nécessite aussi une gestion permanente, qui prend donc du temps.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le bois énergie est une des nombreuses alternatives renouvelables à l'utilisation des énergies fossiles. Son atout le plus mis en avant est son bilan carbone neutre. Dans la pratique, cette énergie est principalement utilisée dans le cadre du chauffage (collectif ou individuel). Il constitue par ailleurs à ce jour encore une alternative économique au gaz ou à l'électricité grâce notamment aux nombreuses subventions de l'état. Cependant, cette "mode" du bois énergie lancée il y a une dizaine d'année commence à s'essouffler en raison d'une mauvaise gestion de nos ressources en bois.

A travers ce projet, nous avons pu découvrir et comprendre ce qu'est le bois énergie, ces tournants et ses aboutissants dans la théorie, via des recherches sur le net, la consultation de magazines et la visite d'un salon (celui du bois énergie à Nantes), ainsi que dans la pratique, à travers la visite des chaufferies Grammont et Maromme.

Tout au long de cette période de projet, notre groupe est parvenu à trouver une organisation dans le travail que ce soit à l'INSA ou à l'extérieur. Ce projet nous a donc apporté de l'expérience pour ce qui est du travail en équipe, de la recherche documentaire ou du contact avec les entreprises. Finalement, il nous semble que les objectifs de ce projet ont été remplis. Il pourrait être intéressant dans la perspective d'une poursuite de ce projet de réaliser des expériences pratiques, comme par exemple la combustion.

APPORTS PERSONNELS :

Dan : Ce projet est pour moi une expérience enrichissante car il m'a permis de découvrir le bois énergie en profondeur : j'ai pu compléter mes connaissances dans ce domaine qui étaient encore très vagues avant le projet physique. Les visites en entreprise m'ont particulièrement intéressé et

m'ont permis d'observer les chaufferies ainsi que d'avoir une première impression du travail des ingénieurs dans ce domaine. En somme, je trouve que notre projet est assez abouti grâce à une bonne organisation au sein du groupe.

Aude : Avant de travailler sur ce projet, je n'avais aucune connaissance précise concernant le bois-énergie, la partie théorique de notre dossier m'a ainsi permis de mieux comprendre cette énergie et ses enjeux en France. De plus, les visites m'ont beaucoup appris sur le fonctionnement d'une chaufferie et sur les technologies utilisées, ce qui m'a apporté des connaissances concrètes sur le chauffage au bois. J'ai trouvé agréable de travailler avec ce groupe sur ce sujet. Chacun s'est investi, ce qui a permis de ne pas prendre de retard et d'avoir une bonne ambiance au fil des séances.

Nicolas : Pour ma part, ce projet m'a à la fois apporté les connaissances "théoriques" sur le bois énergie et m'a permis de découvrir ses applications, particulièrement dans le domaine du chauffage. Pour moi, le plus intéressant reste la visite des sites de chaufferies, car elle nous a permis de mieux appréhender la réalité là où la plupart du temps on se contente de la théorie. Comme tous projets en équipe, il m'a permis de prendre de l'expérience pour ce qui est du travail en groupe et de la répartition de ce dernier entre chacun des membres. Selon moi, ce projet fut mené sans grand soucis car nous fûmes bien encadrés et organisés, prenant à chaque séance, le temps de bien se partager le travail.

Manu : Ce projet m'aura permis d'en apprendre davantage sur l'énergie biomasse, en particulier sur le l'énergie liée au bois. En effet, j'ai découvert le fonctionnement d'une chaufferie et l'organisation d'un réseau de chaleur. Cette partie pratique était très intéressante puisque j'ai pu me rendre compte de la réalité du chauffage domestique et j'ai également observé que l'état du combustible influençait l'apport énergétique. D'autre part, le travail en équipe était très enrichissant. Pour ma part, j'ai eu l'impression qu'il y avait une réelle cohésion dans le groupe.

Philippe : Si nous avons réussi à mener à bien notre projet, c'est principalement par notre organisation et notre entente dans le groupe. Nous avons su établir un planning structuré et cela a été profitable pour le groupe. J'ai aimé cette organisation ainsi que l'écoute de chaque personne qui a été bénéfique pour tous. Ce projet m'a permis de me rendre compte que le travail en groupe permet de mettre en valeur un sujet et que les idées de chacun font avancer et grandir le projet.

Maëlys : Je ne connaissais que très peu au sujet du bois énergie et ce projet m'a permis d'en apprendre plus, en particulier sur les systèmes de chauffage au bois. La visite de la chaufferie de Grammont a été très enrichissante pour la compréhension de son fonctionnement et il était très intéressant d'avoir l'avis d'un professionnel, qui connaît les réalités du sujet. J'ai abordé ce projet avec une certaine appréhension, car nous étions nombreux dans le groupe et que je n'avais pas bien cerné l'intitulé du sujet. Finalement, les explications de l'enseignant et les recherches ont montré ce qui était attendu et l'ensemble des membres du groupe a été bien intégré, chacun a fourni un travail motivé et efficace.

Andréa : Grâce à ce projet j'ai pu découvrir le domaine du bois-énergie qui m'était jusque-là totalement inconnu. J'ai donc beaucoup appris lors de ce projet, aussi bien sur l'aspect pratique, environnemental, chimique, que sur l'aspect économique du bois-énergie. De plus, confronter l'aspect théorique de nos recherches avec les visites des chaufferies a rendu notre projet plus

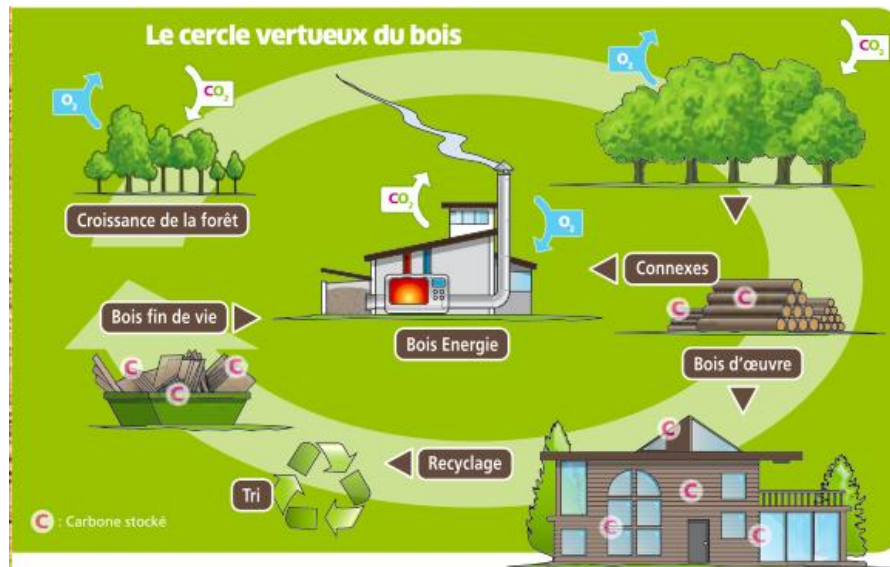
concret pour moi. Ayant assisté aux deux visites, j'ai pu mesurer leurs points communs et leurs différences. Ma partie ne portant pas directement sur les réseaux de chaleur, ces visites m'ont permis de mieux comprendre cet aspect de notre projet. Enfin, je pense que le bilan de notre travail de groupe est plutôt positif. Malgré le nombre important de participants, nous avons réussi à rester organisés, et nous avons tenu les délais que nous nous étions imposés. Nous avons fait preuve d'une bonne dynamique, et avons bénéficié d'une bonne ambiance de groupe, ce qui a rendu notre travail agréable.

7. BIBLIOGRAPHIE

techniques-ingenieur.fr
edf.fr
cibe.fr
ademe.fr
gipeblor.com
wikipedia.org
reseaux-chaleur.cerema.fr
connaissancedesenergies.org
energies-renouvelables.org
energies-environnement.fr
sante-abitibi-temiscamingue.gouv.qc.ca
site-en-bois.net
developpement-durable.gouv.fr
dsp.santemontreal.qc.ca
srfb.be
wikipedia.fr
sante.gouv.fr
biomasse-normandie.org
legifrance.gouv.fr
abibois3.o2switch.net
raee.org
schmid-energy.ch

8. ANNEXES

8.1. Schéma extrait du document "Le bois, la première des énergies renouvelables"



8.2. Tableau 1 : Sous-produits de la pyrolyse en fonction de la température

D'après <http://www.sante-abitibi-temiscamingue.gouv.qc.ca>

Température	Réaction	Sous-produits
Moins de 300°C	Début de la formation de radicaux libres, élimination de l'eau	CO et CO ₂ , groupements carbonyle et carboxyle, et surtout, formation de charbon de bois.
300-450°C	Fractionnement des chaînes de cellulose, formation de polysaccharides par substitution	Mélange de levoglucosanes, formation de goudrons
Plus de 450°C	Réarrangement et scission des sucres	Groupements carbonyle volatils tels acétaldéhyde, glyoxal et acroléine
Plus de 500°C	Un mélange de toutes les réactions précédentes	Un mélange de tous les produits précédents
Condensation (abaissement subit de la température)	Les produits insaturés se collent aux particules de charbon de bois	Le charbon devient plus réactif à cause des résidus goudronnés qu'il a adsorbés

8.3. Tableau du site mdelcc.gouv.qc.ca relatant les effets des fumées issues de la combustion du bois

Contaminants		Effets
Monoxyde de carbone	CO	Maux de tête, nausées, étourdissements et aggravation de l'angine chez les personnes ayant des problèmes cardiaques
Composés organiques volatils	COV	Irritation des voies respiratoires et maux respiratoires; certains COV sont cancérigènes (ex. : benzène)
Acroléine et formaldéhyde	—	Irritation des yeux et des voies respiratoires
Particules fines	PM _{2,5}	Irritation des voies pulmonaires, aggravation des maladies cardiorespiratoires et mortalité plus hâtive
Oxydes d'azote	NO _x	Irritation du système respiratoire, douleur lors de l'inspiration, toux, oedème pulmonaire
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	HAP	Certains HAP sont considérés comme mutagènes ou cancérigènes ou sont soupçonnés de l'être
Dioxines et furannes	—	Cancérigènes probables