

Quelques grandeurs énergétiques importantes

2.3.1.1. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de masse de combustible. Il est différent selon la teneur en eau du combustible puisque la vaporisation de l'eau présente dans l'échantillon consomme une partie de la chaleur dégagée par la combustion de l'échantillon. Le pouvoir calorifique s'exprime de deux manières :

- le pouvoir calorifique supérieur dans le cas où l'eau produite lors de la combustion est entièrement condensée ;
- le pouvoir calorifique inférieur dans le cas où l'eau reste à l'état de vapeur.

Compte tenu du degré d'humidité du bois, de la chaleur perdue dans les fumées (vapeur d'eau, cendres) mais aussi de l'azote contenu dans l'air nécessaire à la combustion, le pouvoir calorifique réel d'un combustible est inférieur au pouvoir calorifique supérieur théorique. Il est donné par la relation suivante (Deglise, 1982) :

$$PCR = (PCS - 4000) \times (1 - 0.012 \times H)$$

Avec : PCR le pouvoir calorifique réel (kJ/kg de bois sec), PCS le pouvoir calorifique supérieur (en kJ/kg de bois sec) et H le taux d'humidité (sur base sèche) du bois (en %).

Le pouvoir calorifique du bois dépend également de la teneur en lignine, cellulose et résine. Que ce soit chez les feuillus ou les conifères, le pouvoir calorifique anhydre est globalement identique d'une essence à l'autre. Les conifères contenant de la résine présentent par contre un pouvoir calorifique supérieur à celui des feuillus. Il est de 4600 kCal/kg de bois sec pour les conifères et 4300 kCal/kg de bois sec pour les feuillus (Bary-Lenger et al, 1999).

2.3.1.2. Taux de matières volatiles

Les matières volatiles représentent l'ensemble des produits gazeux, condensables ou non, qui sont émis par les composés organiques au cours de la carbonisation. Les matières volatiles condensables, hormis l'eau, correspondent au goudron (2 à 4 % lors de la cokéfaction des charbons à coke). Le résidu de distillation à 350-380°C est le brai.

2.3.1.3. Taux de cendres

Les cendres résultent de la pyrolyse des impuretés minérales et des composés organiques. Elles représentent fréquemment quelques pour cent de la masse d'un charbon. Demirbas

Chapitre 1

(1997) a par exemple réalisé des mesures de taux de cendre sur différents types de biomasse. Il a obtenu un taux variant de 0.4 % pour du hêtre jusqu' à 13.5% pour de la paille de blé.

La composition chimique des cendres peut présenter d'importants problèmes opérationnels. En combustion elles peuvent réagir et former des scories ou une phase liquide si la température est élevée. Cela réduit les débits et augmente les coûts d'exploitation (Mc Kendry, 2002). Il est donc important d'avoir un taux de cendres le plus faible possible lors des process de conversion énergétique de la biomasse.

2.3.1.4. Taux de carbone fixe

Le taux de carbone fixe désigne la fraction de combustible solide non dévolatilisé après combustion. Directement lié au taux de matières volatiles il permet finalement une mesure de la facilité avec laquelle la biomasse peut être enflammée puis gazéifiée (ou oxydée selon le type d'utilisation énergétique) (Mc Kendry, 2002). Le taux de carbone fixe est directement déterminé à partir des taux de cendres et de matières volatiles déterminés expérimentalement grâce à l'équation suivante :

$$CF = 1 - TC - MV$$

Avec CF le taux de carbone fixe, TC le taux de cendres et MV le taux de matières volatiles.

Pour des matériaux naturels, il convient de corriger la valeur obtenue expérimentalement du taux de cendres (af : ash free basis) et du taux d'humidité (daf : dry ash free basis).

Dans le domaine de la valorisation énergétique du bois, un taux de carbone fixe important est particulièrement recherché puisqu'il représente la véritable source d'énergie du matériau. C'est le cas dans la sidérurgie où un taux de 85 à 90% de carbone fixe est recherché (Antal et al., 1996). A l'état natif la proportion de carbone fixe dans le bois est comprise entre 20 et 30%.

2.3.2. Quelques domaines d'utilisation du bois énergie

Mis à part son utilisation dans le développement des biocarburants de seconde génération, largement décrit dans ce mémoire, il existe de nombreuses applications de valorisation énergétique du bois.

2.3.2.1. Combustible de chauffage

Aujourd'hui l'application principale du bois énergie est son utilisation en tant que combustible de chauffage : en 2003, 53% de la production mondiale de bois rond a été

utilisée comme bois de feu (FAO, 2005). Depuis la préhistoire et pendant de nombreuses années il a été le seul moyen de chauffage pour l'Homme avant de péricliter au début du 19^{ème} siècle. Ces dernières années, suite à l'augmentation du prix des énergies fossiles et à la volonté grandissante de développer les énergies renouvelables, il connaît une renaissance. Utilisé sous forme de bûches, de plaquettes ou encore de granulés, le bois permet par combustion primaire ou secondaire de fournir l'énergie nécessaire au chauffage des bâtiments. En fonction de l'appareil de combustion utilisé et de certaines caractéristiques du matériau (essence, teneur en eau...) le rendement énergétique est variable. Il peut aller de 40 à 50% pour un poêle à bûches d'ancienne génération jusqu'à 85 à 95% pour des poêles à granulés modernes. Aujourd'hui le bois est utilisé comme combustible de chauffage dans les bâtiments individuels et collectifs. Les chaufferies collectives semblent cependant plus avantageuses puisque le coût de l'installation est plus facilement amorti et que les techniques utilisées permettent une meilleure maîtrise des paramètres de combustion. Il est également utilisé dans de nombreuses usines comme source d'énergie complémentaire, c'est le cas notamment des usines de pâte à papier.

Dans les centrales dites de cogénération la production de chaleur par combustion de biomasse est couplée à une production d'électricité. Le principal intérêt de cette technique est d'associer le bénéfice d'un rendement élevé par récupération de la chaleur, et de diminuer considérablement les émissions polluantes.

Il est également important de noter que dans de nombreux pays en développement la combustion du bois est la principale source d'énergie permettant la cuisson des aliments.

2.3.2.2. Le gaz naturel de synthèse

Le bois, préalablement broyé, est gazéifié à haute température (800 - 900°C) par de la vapeur d'eau (cf. § 1.3.3) et donne un mélange de gaz contenant principalement du dihydrogène (H₂), du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de carbone (CO₂) et du méthane (CH₄). Le mélange est ensuite purifié, méthanisé et nettoyé avant d'être directement injecté dans le réseau de gaz naturel. En juin 2009, la commune de Güssing (Autriche) a inauguré la première centrale de production de gaz naturel de synthèse à partir de bois. Cette inauguration a fait des émules et la Suède envisage elle aussi la construction d'une centrale de gazéification de puissance 20 à 25 fois supérieure à celle de Güssing.

2.3.2.3. Le charbon de bois

Le charbon de bois est produit par chauffage du bois, sous atmosphère inerte ou non, jusqu'à des températures proches de 500°C. Largement utilisés au cours des siècles passés, il est encore fabriqué de manière artisanale dans les pays en développement. De nos jours, il est surtout utilisé en sidérurgie, dans la fabrication de charbons actifs ou pour les barbecues.

3. Le traitement thermique du bois

3.1. GENERALITES

Selon le produit final recherché, il existe plusieurs types de traitements thermiques (figure I-26). Ils s'étendent d'une température proche de 100°C dans le cas du séchage du bois jusqu'à des températures pouvant atteindre les 1000°C dans le cas de la pyrolyse-carbonisation du bois ou lors de sa gazéification.

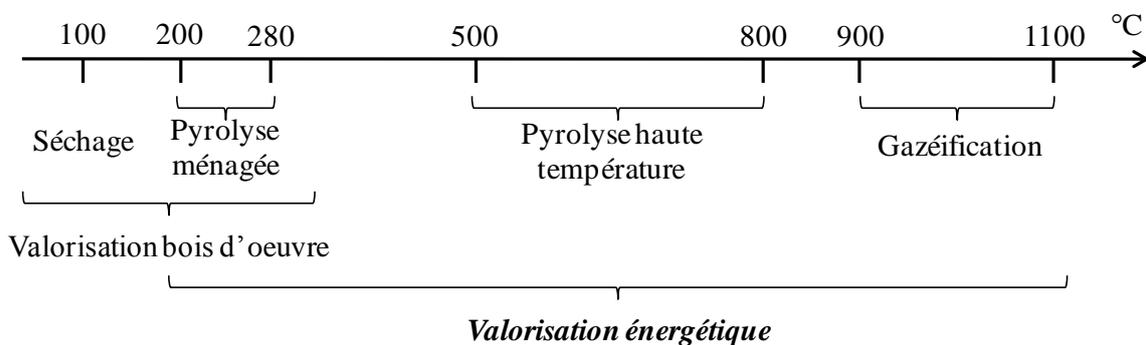


Figure I-26. *Echelle de température des différents traitements thermiques (d'après Rousset, 2004).*

Dans ce travail, seuls les traitements thermiques compris entre 200 et 300°C seront étudiés. De manière générale, le traitement thermique du bois peut se définir comme une pyrolyse ménagée sous atmosphère inerte et contrôlée. Il s'effectue sur une plage de température allant de 180 à 280°C pendant des durées variables (Bourgeois, 1989). Les paramètres de temps et de température ne suffisent cependant pas à eux seuls à garantir la qualité de traitement souhaitée. D'autres facteurs peuvent affecter le processus (Chanrion et Schreiber, 2002) :

- Les facteurs dépendant de l'état initial du matériau :
 - l'essence de par sa composition chimique et son organisation cellulaire ;
 - l'humidité initiale qui influence la perte de masse ainsi que les cinétiques et les transferts de chaleur et de masse ;
 - la géométrie et la taille des échantillons.
- Les facteurs dépendant du procédé proprement dit :
 - la nature de l'atmosphère ;
 - le taux de remplissage du four ou l'épaisseur du lit ;
 - la pression ;
 - la présence de catalyseurs.

3.2. LES DIFFERENTS PROCÉDES DE TRAITEMENT THERMIQUE « BASSES TEMPERATURES »

Depuis le développement du traitement thermique du bois dans les années 80, de nombreuses techniques de traitement ont vu le jour en Europe comme en Amérique du Nord. Certains de ces procédés sont maintenant des marques déposées, c'est le cas du Bois rétifé®, du Bois perdue®, du Bois chauffé®, de Thermowood® ou encore du Bois Plato®. Toutes ces technologies ont comme point commun la maîtrise de trois paramètres essentiels au traitement : la température du traitement, la vitesse de chauffe et la durée du traitement. Elles permettent toutes d'obtenir un matériau aux propriétés modifiées. C'est en fait au niveau de la façon dont ces paramètres sont mis en œuvre que des différences apparaissent d'un procédé à l'autre. Le choix de l'une ou l'autre des technologies requiert l'examen rigoureux de plusieurs critères (CRIQ, 2003) :

- la capacité du promoteur à fournir un support R-D et technique de qualité;
- le pourcentage (vérifié) de déclassement après traitement;
- l'expérience cumulée d'une technologie;
- l'expertise spécifique du promoteur en lien avec la fabrication d'un produit en particulier;
- les coûts d'énergie de chauffe/m³ de bois modifié thermiquement;
- le choix des fours en fonction des volumes et de la diversité des produits à commercialiser;
- la versatilité des enceintes de traitement et la capacité du promoteur à développer une image de marque de qualité;
- la matière première et/ou le produit final souhaité.

Les parties qui suivent sont une liste non exhaustive des principaux procédés existants. Les avantages et inconvénients de chaque technologie y sont présentés.

Il est important de noter que l'ensemble de ces procédés ne concernent que le bois utilisé en tant que matériau d'ouvrage, dans le cas d'une utilisation énergétique du bois traité thermiquement, les conditions de traitement sont différentes. A l'heure actuelle il n'existe aucun procédé commercial développé pour cet usage.

3.2.1. Le traitement à la vapeur d'eau

Ce procédé a été développé en Hollande par la société Plato tout au début des années 90 à partir de travaux réalisés chez Shell. Il est connu sous le nom de procédé Plato® et a fait l'objet de trois brevets.

La technologie se décompose en cinq étapes (CRIQ, 2003) :

- une étape d'hydro-thermolyse où le bois est chauffé à une température de 180°C en milieu aqueux sous une pression de 6 à 8 bars ;
- un séchage effectué dans un séchoir conventionnel qui permet de ramener l'humidité des bois à 8-10% ;
- un nouveau chauffage du bois à une température de 180°C en conditions sèches et sous pression atmosphérique. C'est l'étape de durcissement ;
- l'humidité des bois est ensuite remontée à 4-6% pour son utilisation.

Depuis août 2000 la société Plato dispose d'un site de production de 50000 m³ situé près d'Arnhem.

Un autre procédé, celui du Technical Research Center of Finland (VTT), utilise aussi de la vapeur d'eau mais sans pression et à des températures comprises entre 150 et 200°C. Il est plus connu sous le nom de procédé Thermowood®.

3.2.2. L'oléothermie, procédé OHT (Oil Heat Treatment)

Le principe de ce procédé consiste à charger des bois secs (6%) dans un autoclave rempli d'huile végétale chaude qui joue le rôle de vecteur thermique. L'huile utilisée peut être de l'huile de colza, de lin ou de tournesol. Différentes températures (de 180 à 260°C) et pressions (de 2 à 14 bar) peuvent être utilisées en fonction des propriétés voulues pour le matériau final. Une dernière phase de réchauffement à l'air (entre 60 et 220°C) permet le durcissement de la couche d'huile en surface du bois. La durée totale d'un cycle est de l'ordre de 18 heures (Rousset, 2004). Malgré quelques défauts comme celui de provoquer des dégâts internes importants (collapses, fissures...) cette technologie présente l'avantage d'être adaptée aux pièces de forte section et aux essences peu imprégnables (Rapp et Sailer, 2002).

Ce procédé a été développé en Allemagne par la société Menz Holz et fait l'objet d'un brevet. Actuellement la société Menz Holz a un site de production à Reulbach en Allemagne, opérationnel depuis août 2000, sa capacité de production est 2900 m³/an (Rapp et Sailer, 2002).

Un procédé similaire appelé procédé de « friturage » a été développé en France par le CIRAD-FORET. A la fois simple, peu coûteux et peu nocif pour l'environnement, ce procédé se distingue du procédé Menz Holz par le fait que le bois est successivement plongé dans un bain d'huile chaude (110 à 210°C) et froide (10 à 90°C) permettant une meilleure pénétration du produit.

3.2.3. Le traitement sous gaz inerte

Les tout premiers travaux réalisés sur le traitement thermique du bois après la crise pétrolière des années 76-77 utilisent un gaz inerte comme vecteur thermique. C'est le cas notamment du procédé de réticulation[®], un néologisme issu de la contraction des mots « réticulation » (dû au fait de la mise en évidence de phénomènes de réticulation de la matière ligno-cellulosique) et « torréfaction ». Développé dans les années 80 à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, ce procédé consiste en une pyrolyse ménagée réalisée sous atmosphère inerte. Il se décompose en trois grandes étapes :

- une phase endothermique correspondant au séchage du bois (entre 20 et 150°C) ;
- une phase de thermolyse des hemicelluloses et de réticulation de la lignine (entre 180 et 250°C) ;
- une phase de dégradation des lignines et de la cellulose (à partir de 250°C) associé à un dégagement important de chaleur à partir du bois.

La société New Option Wood (Now) détient aujourd'hui l'ensemble des brevets et assure les transferts auprès des licenciés, l'Ecole Nationale Supérieures des Mines de Saint-Etienne joue le rôle d'accompagnateur scientifique. Quelques sites de production sont présents sur le sol français, on peut citer notamment (Chanrion et Schreiber, 2002) :

- la société HTT à Soustons dans les Landes (1997) qui traite en majorité du pin maritime. Elle a la particularité de disposer d'un système de refroidissement par injection d'eau permettant un refroidissement rapide du four,
- la société RETIBOIS près de Saint Etienne (1998) qui dispose d'un système de lavage des gaz issus du traitement,
- la plateforme RETIMAC (2001) à Rodez.

D'autres sociétés utilisent un procédé quasiment identique, c'est le cas notamment de la société Pluri-Cap Inc (PCI) au Canada qui commercialise ses produits sous le nom de bois Perdure[®] ou encore de la société suisse In Wood International SA (IWI) qui produit le bois Intemporis[®]. Cette dernière technique présente l'avantage d'avoir une source de chaleur complètement séparée du four ce qui réduit de façon importante les points chauds critiques dans la charge et permet de construire des enceintes de grands volumes.

3.2.4. Le traitement par conduction

Dans ces procédés, l'échantillon à traiter est mis sous pression entre deux plaques métalliques chauffantes, le transfert thermique est de type conductif. Les planches de bois

et les plaques métalliques sont empilées les unes sur les autres dans une enceinte isolée thermiquement. Le vide est réalisé dans l'enceinte ce qui permet d'optimiser le traitement et l'isolation thermique mais permet également la récupération de produit de décomposition dont la partie condensable peut être valorisée. Le traitement, d'une durée de 30h environ, est composé d'une phase de séchage, d'une phase de traitement thermique (entre 200 et 240°C) et d'une phase de refroidissement (Nguila Inari, 2008).



Figure I-27. Le four de recherche et développement (PRODEO).

Ce procédé a été utilisée par la société PRODEO en Suisse qui en décembre 2006 a ouvert une usine à Avenches d'une capacité de production de 1200 m³/an. Malheureusement suite à de nombreuses avaries de four et aux importants retards de livraisons qui en ont suivi, la société a été mise en faillite en juillet 2009.

3.3. LES MODIFICATIONS DU BOIS CAUSEES PAR LE TRAITEMENT THERMIQUE

3.3.1. Les transformations anatomiques

Le traitement thermique du bois s'accompagne d'importantes modifications anatomiques directement liées à une augmentation de la fragilité du matériau. Ces modifications sont variables d'une essence à l'autre et selon le procédé de traitement utilisé (Boonstra, 2006). Les conifères sont ainsi plus sensibles aux fissures tangentielles dans les parties de bois final surtout chez les essences pour lesquelles la transition entre bois initial et bois final est brutal.

Les modifications anatomiques sont nombreuses et diverses puisqu'elles touchent un grand nombre d'éléments anatomiques du bois. Fengel et Wegener (1989) ont observé des échantillons d'épicéa traités à 150°C (pendant 24 heures) par microscopie électronique et

ont mis en évidence l'apparition de fissures dans le matériau notamment entre les couches S1 et S2 des parois des trachéides ainsi qu'au niveau du coin des cellules. Boonstra et al (2006) ont étudié les modifications anatomiques de conifères (2006a) et de feuillus (2006b). Comme Fengel et Wegener (1989) ils ont constaté l'apparition de fissures dans tous les types d'essences. Ils ont également observé une dégradation des cellules parenchymateuses des rayons ligneux et des cellules épithéliales entourant les canaux résinifères dans l'aubier de pin. Chez certains feuillus (hêtre et peuplier), le traitement thermique entraîne des phénomènes de collapse des vaisseaux et des déformations des fibres libriformes. Les feuillus tropicaux sont également affectés. Almeida et al. (2010) ont ainsi observé l'apparition de fissures sur des échantillons d'eucalyptus (*Corymbia citriodora*) traité à 280°C pendant 5h (figure I-28). Elles apparaissent surtout dans les tissus les plus fragiles, parenchyme radial et longitudinal en l'occurrence.

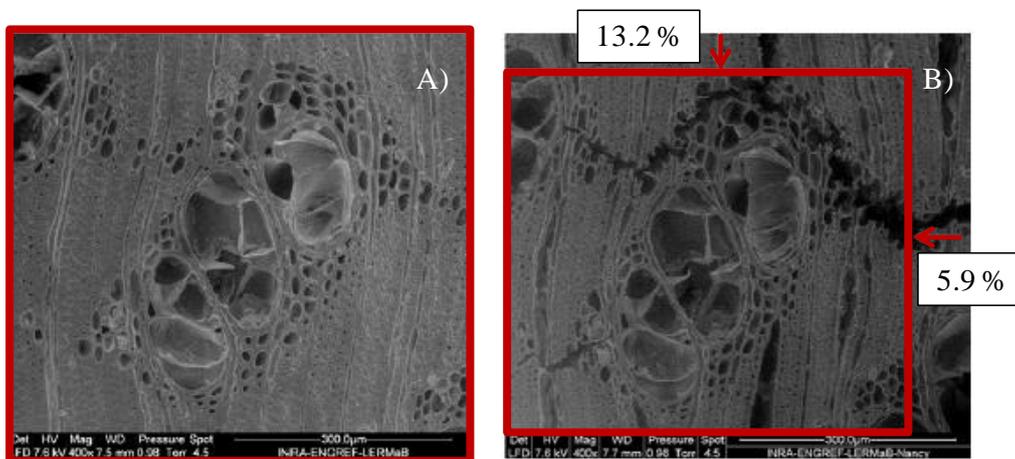


Figure I-28. Plan transversal d'eucalyptus natif (A) et traité thermiquement à 280°C pendant 5h (B). Le carré rouge montre les déformations de l'échantillon après traitement (Almeida et al., 2010).

Hietala et al. (2002) ont observé des échantillons de pin natifs et traités grâce à la technique RMN 2H. Ils n'ont pas remarqué de différence dans la dimension des cellules après traitement mais ont observé par contre une augmentation de la taille des pores dans les parois du bois. Andersson et al. (2005) ont quant à eux montré que la porosité des parois cellulaires, déterminée par rayons X, est augmentée.

3.3.2. Les modifications chimiques

3.3.2.1. La perte de masse

Les auteurs qui ont travaillé sur le traitement thermique du bois ont dans leur grande majorité évalué la perte de masse des échantillons après traitement.

Elle est donnée par l'équation suivante :

$$PM = \frac{M_0 - M_f}{M_0} \times 100$$

avec M_0 (en g) la masse anhydre initiale de l'échantillon avant traitement, M_f (en g) la masse anhydre de l'échantillon après traitement et PM la perte de masse (en %).

Leurs résultats montrent que la perte de masse dépend essentiellement des paramètres de temps et températures des traitements ainsi que de l'espèce étudiée. Esteves et al. (2007) trouvent par exemple une perte de masse plus importante chez l'eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) que chez le pin maritime (*Pinus pinaster*) à conditions de traitement équivalentes. L'ensemble des études s'accordent sur le fait que, lorsque les intensités de traitement augmentent, la perte de masse augmente (Brito et al., 2008 ; Alèn, 2002). En fait, pour une espèce donnée, la perte de masse est un excellent indicateur de l'intensité de traitement et certains auteurs l'utilisent comme « élément de comparaison » pour l'étude des modifications de certaines propriétés du matériau pendant le traitement thermique (Almeida et al., 2010).

C'est en fait la dégradation des composés chimiques du bois et particulièrement la dégradation des hémicelluloses qui explique la perte de masse des échantillons. Le détail des modifications chimiques subies par le bois pendant le traitement thermique est présenté dans les parties suivantes.

3.3.2.2. Dégradation des hémicelluloses

Les hémicelluloses sont les composés chimiques les plus sensibles au traitement thermique. Leur dégradation commence à des températures proches de 180°C (Tjeerdsman, 1998 ; Sivonen, 2002). La nature et la proportion des hémicelluloses varient d'une espèce à l'autre (cf § 2.1.3) et n'ont pas toutes le même comportement au traitement thermique. Ainsi, Alèn et al. (2002) montrent que les xylanes sont les hémicelluloses qui se décomposent le plus facilement et expliquent ainsi en partie la plus grande sensibilité au traitement thermique des feuillus. Ces observations sont confirmées par Kamdem et al. (2002) qui montrent que les hexoses, surtout présents dans les hémicelluloses de conifères, sont plus stables que les pentoses essentiellement présents dans les hémicelluloses des feuillus.

La dégradation thermique des hémicelluloses conduit à la formation de nombreux produits que l'on retrouve essentiellement sous forme gazeuse. Les produits formés en grande majorité sont de l'acide acétique, de l'acide formique et du furfural (Bourgeois et Guyonnet, 1988). On trouve également du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone et du méthanol (Avat, 1993). La quantité de chacun des produits formés dépend de l'essence et de l'intensité de traitement étudiée.

La dégradation des hémicelluloses débute par la formation d'acides organiques (acétique et formique) qui vont servir de catalyseurs à la dégradation des carbohydrates et donc réduire leur degré de polymérisation (Tjeerdsma et al., 1998 ; Nuopponen, 2005). La dégradation des carbohydrates conduit essentiellement à la formation de formaldéhydes, d'aldéhydes et de furfural (Tjeerdsma et al., 1998) qui peuvent réagir avec les composés phénoliques de la lignine pour former un nouveau réseau moléculaire hydrophobe (Agrawal, 1988 ; Tjeerdsma, 1998). Plus précisément, Bourgois et Guyonnet (1988) montrent que l'acide acétique est formé par désacétylation des xyloses, l'acide formique par réaction des groupements carboxyliques de la chaîne glucuronique (dégradation de l'acide 4-O-méthylglucuronique) et le furfural par déshydratation des xyloses.

Bien que les réactions de dégradation des hémicelluloses soient relativement bien identifiées, les mécanismes réactionnels ne sont quant à eux pas clairement définis. Ceci est certainement dû à la diversité des espèces étudiées par les nombreux travaux à ce sujet. Cozzani et al. (1997) cité par Rousset (2004) montrent que la dégradation des hémicelluloses suit un schéma mono-réactionnel avec des énergies d'activation et facteurs pré-exponentiels qui dépendent fortement du type d'hémicellulose. D'autres auteurs privilégient plutôt un schéma à deux (Di Blasi et Lanzetta, 1997) voire à trois réactions successives (El-Kalyoubi et al., 1985 cité par Rousset, 2004). Il est important de noter que les réactions qui interviennent dans un deuxième et/ou troisième plan se déroulent à des températures supérieures à 300°C, plage de température qui n'est pas étudiée dans ce travail.

3.3.2.3. Transformation de la cellulose

Dans les domaines d'intensités de traitement étudiées au cours de ce travail, la cellulose est le composé le moins affecté par le traitement thermique. Grâce à son importante masse molaire et son fort degré de cristallinité, la dégradation de la cellulose est significative à partir de 300°C (Belville, 1982 cité par Bourgois et Guyonnet, 1988), même si certains auteurs montrent qu'elle peut débiter pour des températures proches de 230°C (Repellin, 2006).

Du fait de son importance dans les matériaux ligno-cellulosiques, l'étude de la cellulose a un intérêt particulier pour bon nombre de chercheurs. Les nombreuses réactions de dégradation thermique de la cellulose proposées dans la littérature montrent la complexité des mécanismes mis en jeu.

Chapitre 1

Kilzer et Broido, cités par Beall (1970), proposent par exemple une succession d'étapes où deux mécanismes réactionnels agissent en parallèle :

- la cellulose est déshydratée en « déshydrocellulose » entre 200 et 280°C ;
- en parallèle, la cellulose est dépolymérisée formant des composés volatiles principalement constitué de levoglucosanne. Il sera par la suite transformé en acide formique, acide acétique phénol et eau (Repellin, 2006) ;
- la déshydrocellulose est ensuite transformée en gaz (CO₂ et CO) et charbon par réaction exothermique qui devient dominante à partir de 320°C. Cette dégradation est catalysée par les acides organiques formés lors de la dégradation des hémicelluloses (Wikberg et Maunu 2004).

Ces réactions de dégradation thermique affectent essentiellement les parties amorphes de la cellulose ce qui augmente proportionnellement sa cristallinité (Bhuiyan et Hirai, 2005 ; Wikberg et Maunu, 2004).

3.3.2.4. Réticulation des lignines

Les lignines présentent un comportement au traitement thermique différent des autres composés du bois. Aux intensités de traitement étudiées dans ce travail, de nombreuses études montrent une augmentation de taux de lignine lorsque l'intensité de traitement augmente. Pour du pin maritime, Bourgois et Guyonnet (1988) montrent une augmentation de 28 à 84% du taux de lignine entre des échantillons natifs et traités à 260°C pendant 4h. En fait, les méthodes expérimentales standard souvent utilisées pour déterminer le taux de lignine ne permettent pas d'évaluer un taux de lignine pure et c'est souvent un taux de composés « insolubles dans l'acide » qui est déterminé (lignine de Klason pour les bois naturels).

Au cours du traitement thermique certains produits de dégradation et notamment ceux issus de la dégradation des hémicelluloses peuvent se recondenser et former des produits insolubles dans l'acide. Par arrachement de l'hydrogène des fonctions phénoliques, le traitement thermique entraîne la formation de radicaux phénoxy qui peuvent réagir avec les radicaux instables formés lors de la dégradation des hémicelluloses pour former des radicaux phénoxy stables et finalement un réseaux lignine-carbohydate aux excellentes propriétés (Tjeerdsma et al., 1998 ; Agrawall, 1988). Les radicaux phénoxy produits par le traitement thermique peuvent également interagir entre eux, c'est la réticulation de la lignine. La figure I-29 montre un exemple de réaction de réticulation de la lignine (Rousset, 2006) :

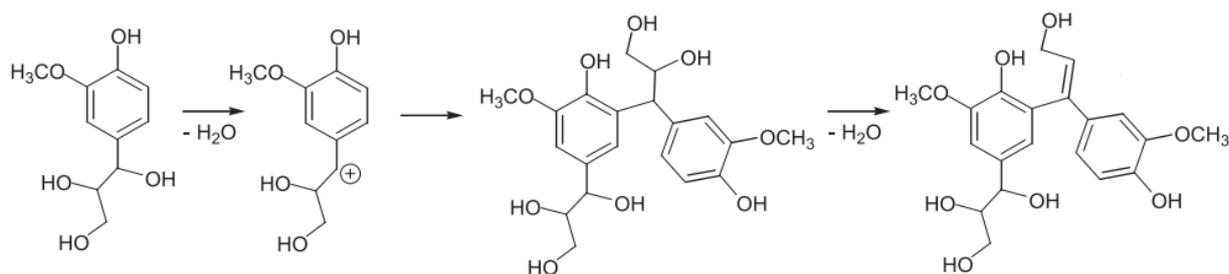


Figure I-29. Exemple de réactions de réticulations possibles sur un modèle de lignine.

La réticulation dépend essentiellement du type d'unité présente dans la lignine. Ainsi, Avat (1993) note qu'après 15 minutes de traitement, les réticulations sont plus importantes et plus rapides pour les unités syringyles que guaïacyles lorsque la température augmente (jusqu'à 305°C). Les unités syringyles étant en nombre bien plus important chez les feuillus que chez les conifères, leurs lignines se condensent donc plus rapidement. Le taux de lignine, ou « d'insolubles dans l'acide », augmente donc davantage chez les feuillus que chez les conifères. Avat (1993) montre ainsi que le taux d'insolubles dans l'acide passe de 17.2% à 55.3% pour le hêtre et de 27.1% à 57% pour le pin lorsque la température de traitement passe d'une température ambiante à 305°C (pour une durée de 15 min). L'augmentation du taux de composés insolubles dans l'acide, souvent simplifié en taux de lignine, s'explique donc par une augmentation du taux de lignine réticulée et du taux du complexe lignine-carbohydrate. Bien évidemment, il n'y a pas de formation de lignine durant le traitement thermique.

La dégradation réelle de la lignine, même si elle commence lentement à de faibles intensités de traitement, n'est effective qu'à des températures supérieures à 400°C (Avat, 1993).

3.3.2.5. Les extractibles

Durant le traitement thermique les extractibles évoluent de manière variable. La plupart d'entre eux, surtout les plus volatiles, disparaissent mais de nouveaux composés issus de la dégradation des composés du bois apparaissent et se retrouvent dans la partie « extractible ». Hakkou et al. (2005) montrent que pour de faibles intensités de traitement, les extractibles augmentent alors qu'ils diminuent lorsque les traitements sont plus intenses. Ces auteurs expliquent que la dégradation des hémicelluloses dans les faibles intensités de traitements produit des composés extractibles alors que pour des traitements plus intenses, tous les composés, y compris les extractibles, sont dégradés. La décomposition des extractibles est similaire à la lignine mais se produit cependant à des températures légèrement plus basses et à des vitesses plus élevées (Raveendran et al., 1996). Les principaux produits obtenus issus de la dégradation des extractibles sont des acides carboxyliques aliphatiques ainsi que des hydrocarbures aliphatiques mais peu de dioxyde de

carbone en raison du faible rapport oxygène/carbone des composés extractibles (Alèn et al. 1996).

3.3.3. Modification des propriétés énergétiques

3.3.3.1. Le taux de cendres et de matières volatiles

Arias et al. (2007) ont réalisé la mesure de certaines propriétés énergétiques d'eucalyptus traité à différentes intensités de traitement. Leurs résultats montrent notamment que le taux de matières volatiles diminue avec l'intensité de traitement alors que le taux de cendre augmente. L'augmentation du taux de cendre serait due à l'augmentation du taux de lignine puisque selon Raveendran et al. (1996) le taux de cendres est directement fonction du taux de lignine, de silice et de cendres dépourvues de silice. La diminution du taux de matières volatiles serait en revanche due à l'augmentation des transferts de chaleur lors de l'augmentation des intensités de traitement qui facilite la dégradation des molécules volatiles (Fassinou et al., 2008).

3.3.3.2. Le taux de carbone fixe

Comme attendu, les auteurs qui ont évalué les propriétés énergétiques du bois traité thermiquement ont tous montré une augmentation du taux de carbone fixe. Almeida et al. (2010) montrent une augmentation linéaire du taux de carbone fixe en fonction de l'intensité de traitement (perte de masse) dans le cas d'échantillons d'*eucalyptus grandis*, *saligna* et *citriodora* traités thermiquement. Cette augmentation est particulièrement intéressante pour une valorisation énergétique du bois. Une augmentation de 16% du taux de carbone fixe permet par exemple de réduire de 4.3kg la quantité de charbon nécessaire à la production d'une tonne d'acier (Assis et al., 1982 cité par Almeida et al., 2010).

3.3.3.3. Le pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique augmente également avec l'intensité du traitement thermique. Certains auteurs montrent une relation de proportionnalité entre ces deux grandeurs (Almeida et al., 2010). Une augmentation du pouvoir calorifique est particulièrement souhaitable car elle traduit une augmentation de la « quantité d'énergie » présente dans l'échantillon. L'excellente corrélation trouvée par Demirbas (2001) montre que l'augmentation du pouvoir calorifique est due à l'augmentation du taux de composés insolubles dans l'acide comme la lignine. D'autres auteurs ont montré une corrélation entre l'évolution du pouvoir calorifique et l'évolution du taux de carbone fixe ainsi que celle du taux de matière volatile (Parikh, 2005).

3.3.3.4. Rendement énergétique

Le rendement énergétique est donné par l'équation suivante (Almeida, 2010) :

$$\eta_E = \eta_M \times \left(\frac{PCS_t}{PCS_n} \right)_{daf}$$

Avec PCS_t et PCS_n les pouvoirs calorifiques du bois traité et natif, η_E le rendement énergétique et η_M le rendement massique déterminé par l'équation suivante :

$$\eta_M = \left(\frac{M_t}{M_n} \right)_{daf}$$

avec M_t la masse anhydre de l'échantillon traité et M_n la masse anhydre de l'échantillon natif Daf : échantillons sans cendres.

Les auteurs qui ont évalué cette grandeur montrent tous une légère diminution du rendement énergétique (toutefois proche de 80 – 90%) quelque soit le type de bois étudié (Bergman et al. 2005, Arias et al. 2008 et Almeida et al. 2010). Grâce à l'augmentation du pouvoir calorifique supérieur, le rendement énergétique diminue « moins vite » que la perte de masse, l'écart entre ces deux grandeurs augmentant avec l'intensité de traitement (jusqu'à 280°C) (Almeida et al., 2010).

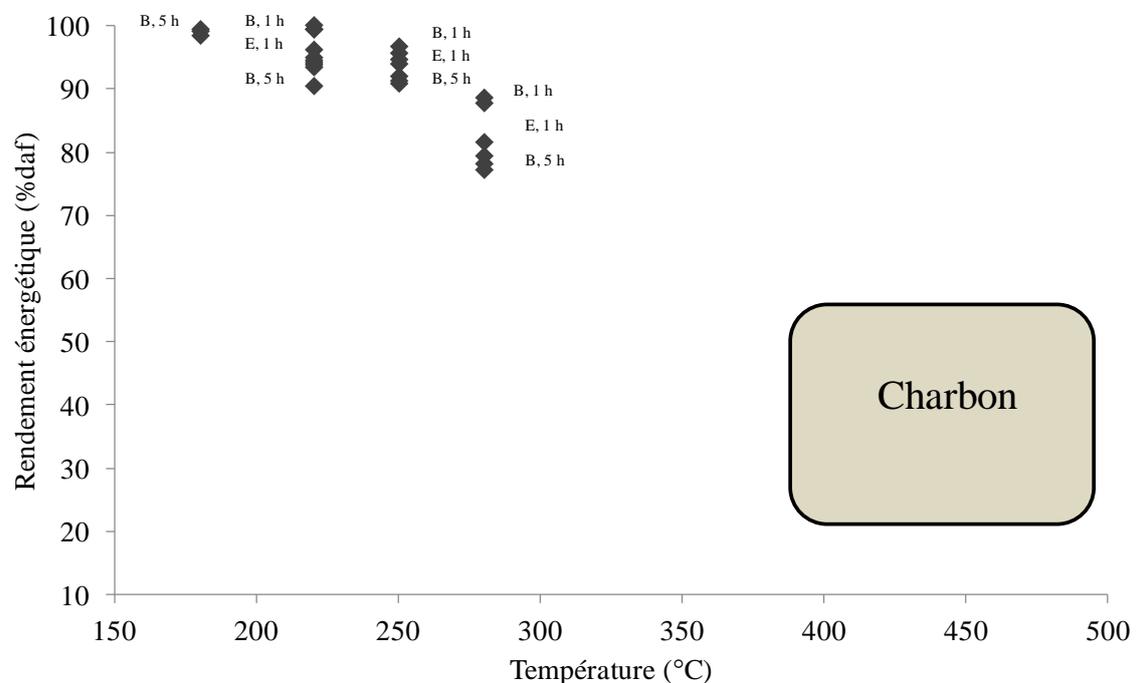


Figure I-30. Rendement énergétique de bois (B) et d'écorce (E) de différentes espèces d'eucalyptus traités thermiquement à différentes conditions. Les données du charbon sont issues de Schenkel et al. (1997) (Almeida et al., 2010).

La comparaison avec des rendements énergétiques obtenus pour du charbon (Schenkel et al., 1997) montre clairement l'avantage de la torréfaction comme moyen de concentrer l'énergie dans la biomasse (Almeida et al., 2010) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

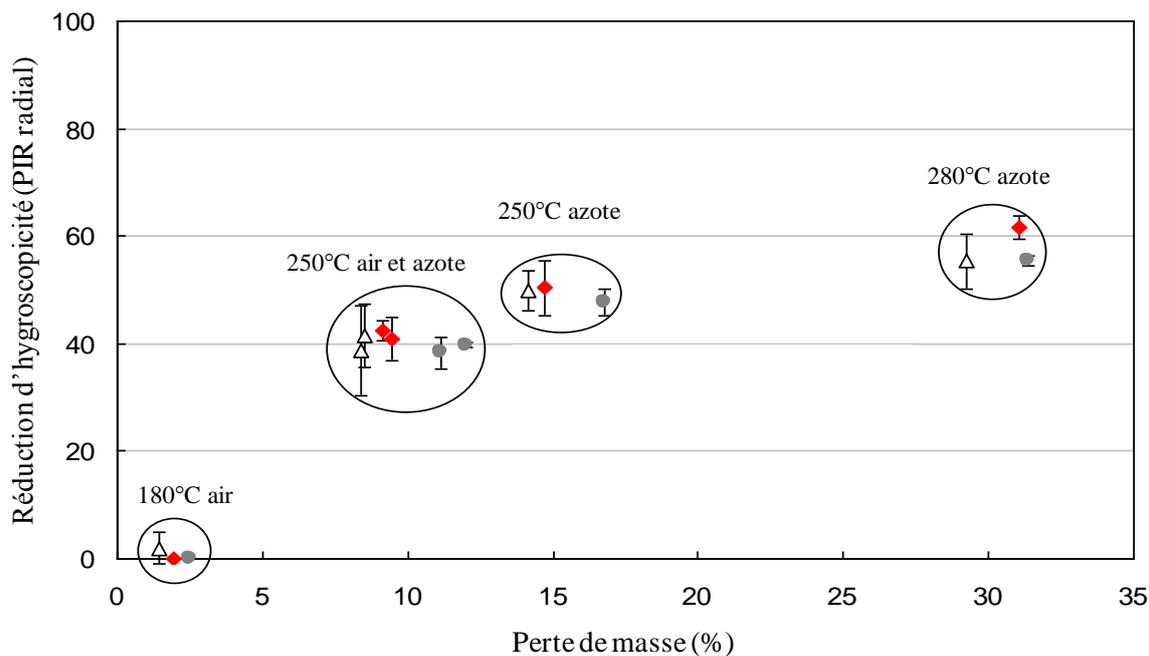
3.3.4. Les modifications physico-mécaniques

Les modifications chimiques subies par le bois lors d'un traitement thermique ne sont pas sans conséquence et influent directement ses propriétés physico-mécaniques. Les principales modifications sont décrites dans la partie suivante.

3.3.4.1. Teneur en eau et stabilité dimensionnelle

Un des principaux effets du traitement thermique connu est la diminution de la teneur en eau d'équilibre du bois et donc une amélioration de sa stabilité dimensionnelle. C'est d'ailleurs en partie pour cela que le traitement est utilisé comme alternative à l'utilisation des produits de préservation souvent polluants.

Les études réalisées montrent donc toute une diminution de la teneur en eau d'équilibre du bois quelle que soit l'espèce. Il semblerait cependant que certaines essences réagissent mieux que d'autres. Esteves et al. (2007) ont mesuré la teneur en eau d'équilibre du bois d'eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) et de pin (*Pinus pinaster*) traités thermiquement à des intensités croissantes et équilibrés à 35, 65 et 85% d'humidité relative à 20°C. Les deux espèces présentent une diminution de la teneur en eau d'équilibre quelle que soit l'humidité relative lorsque les intensités de traitement augmentent. Quelle que soient l'humidité relative et l'intensité de traitement, la teneur en eau d'équilibre de l'eucalyptus est inférieure à celle du pin. Almeida et al. (2009) ont étudié la relation eau/bois de micro-échantillons traités thermiquement provenant de trois espèces d'eucalyptus. Le point de saturation des fibres (PSF), l'anisotropie du bois (rapport T/R), l'hygroscopicité et le coefficient d'anti-retrait (ASE) ont été mesurés. Leurs résultats montrent que les propriétés physiques étudiées sont significativement améliorées pour des températures supérieures à 220°C (5 heures). A cette température, la réduction d'hygroscopicité est par exemple supérieure à 40% (figure I-31).



PIR: Point d'Intersection de Retrait (intersection entre la partie linéaire de la courbe de retrait et l'axe des abscisses)

Figure I-31. Réduction d'hygroscopicité en fonction de la perte de masse. Δ *Eucalyptus grandis*, \blacklozenge *Eucalyptus saligna*, \bullet *Eucalyptus citriodora*. Les barres d'erreur indiquent l'écart-type à 95% d'intervalle de confiance (Almeida et al., 2009).

Les modifications chimiques subies par le bois au cours du traitement thermique sont responsables de ces changements. La dégradation des hémicelluloses diminue le nombre de groupements hydroxyles diminuant d'autant les sites adsorption de l'eau (Burmester cité par Boonstra et Tjeerdsma, 2006). D'autre part, l'augmentation de la cristallinité de la cellulose rend les groupements hydroxyles de ce polymère moins accessibles et donc des liaisons avec les molécules d'eau d'autant plus difficiles (Tjeerdsma, 1998, Bhuiyan et Hirai, 2005). Les réactions de réticulation des lignines (cf § 3.3.2) qui forment un nouveau réseau hydrophobe contribuent elles aussi à la diminution de l'hygroscopicité du bois (Tjeerdsma, 1998).

La diminution de la teneur en eau d'équilibre du bois liée aux modifications chimiques du bois entraîne une amélioration de sa stabilité dimensionnelle. Cette amélioration est cependant liée à l'espèce étudiée et à la direction du bois. Esteves et al. (2007) montrent ainsi que même si la stabilité dimensionnelle est légèrement améliorée en direction tangentielle, le caractère anisotrope du retrait du bois est conservé. Aux mêmes intensités de traitement ces auteurs montrent également que l'augmentation de stabilité dimensionnelle est meilleure pour l'eucalyptus que pour les pins.

3.3.4.2. Durabilité

La durabilité du bois traité thermiquement a fait l'objet de nombreuses études. Globalement, elles montrent toutes que la durabilité augmente avec l'augmentation des intensités de traitements. Hakkou et al. (2006) par exemple montrent qu'à partir de traitements à 200°C pendant 8h, la perte de masse d'échantillons de hêtre soumis à un champignon de pourriture blanche (*Coriolus versicolor*) passe de 35% à 1% environ

Même si le traitement thermique augmente considérablement la durabilité, chaque type de traitement est plus ou moins efficace. Welzbacher et Rapp (2002) cités par Esteves (2009) ont étudié l'efficacité du type de traitement thermique (Thermowood®, Plato®, OHT®, Rétification®) sur la résistance du bois à l'attaque de champignons (*Oligoporus placenta*, *Coriolus versicolor*...). Ils ont montré que tous les traitements augmentent la durabilité des bois, chacun des procédés de traitement étant plus ou moins efficace selon le type de champignon étudié. Dans le cas de bois soumis au champignon *Coriolus versicolor*, ces auteurs montrent que le procédé OHT (Oil Heat Treatment) présente les meilleurs résultats (5% de perte de masse) suivis des procédés Plato® (6%) et de Rétification® (7%).

Selon Weiland et Guyonnet (2003), la meilleure résistance du bois traité thermiquement aux champignons serait due à trois phénomènes :

- les molécules issues de la dégradation des hémicelluloses et qui réticulent avec la lignine forment un nouveau substrat (cf. § 3.3.2.4) qui n'est plus « reconnu » par le système enzymatique du champignon ;
- le traitement thermique diminue l'humidité d'équilibre du bois (cf. § 3.3.4.1) rendant le matériau moins adapté à l'installation des champignons ;
- les champignons se nourrissent surtout d'hémicellulose, leur dégradation entraîne donc inévitablement une diminution des réserves nécessaires à leur développement.

La résistance aux insectes est variable. Le traitement thermique n'augmente pas la résistance aux termites mais augmente celle à *Hylotrupes bajulus*, *Lyctus brunneus* et *Annobium punctatum* (Militz 2002 cité par Esteves 2007).

3.3.4.3. Propriétés mécaniques

Les faibles propriétés mécaniques du bois traité thermiquement sont connues et constituent la principale limite au développement du bois traité thermiquement dans la construction. Elles peuvent être cependant recherchées notamment dans les procédés de broyage dans les centrales de gazéification par exemple.

Les nombreuses études réalisées sur ce sujet montrent une diminution des propriétés mécaniques du matériau lorsque les intensités de traitement augmentent quels que soient les espèces et les procédés de traitement utilisés. L'influence de ces paramètres est cependant plus ou moins importante selon les propriétés mécaniques étudiées.

Des éprouvettes de pin et d'eucalyptus traitées thermiquement à la vapeur et testées en flexion 3 points par Esteves et al. (2007) présentent une augmentation du module d'Young pour des pertes de masses inférieures à 4% suivie d'une diminution pour des traitements plus intenses. Ces mêmes auteurs montrent une diminution quasi-linéaire de la résistance en flexion en fonction de l'intensité de traitement pour ces deux essences. L'eucalyptus présente néanmoins une diminution de sa résistance en flexion plus importante pour des pertes de masse inférieures à 10% alors qu'elle est constante pour des traitements plus intenses. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Boonstra et al. (2007) sur du pin écossais traité selon le procédé Plato®. L'atmosphère du traitement réalisé influe sur les propriétés du bois en flexion. Kubojima et al. (2000) montrent ainsi que le module d'élasticité et la résistance en flexion sont meilleures lors d'un traitement sous azote que sous air. Sailer et al. (cité par Rapp, 2001) observent quant à eux une légère baisse du module d'élasticité du pin sylvestre traité selon le procédé OHT comme lors d'un traitement sous air. Ils obtiennent en revanche une réduction de la résistance en flexion dynamique plus importante pour des échantillons traités selon le procédé OHT (réduction de 51%) que pour des échantillons traités sous air (réduction de 37%). Kubojima et al. (2000) ont aussi réalisé des essais de flexion dynamique. Ces auteurs montrent que le bois traité est plus fragile en flexion dynamique qu'en flexion statique. Lorsque le taux de déformation augmente, la fragilité du bois traité augmente davantage que celle du bois natif.

Les propriétés en traction/compression sont également affectées par le traitement thermique. En compression, l'anisotropie du bois est réelle. Boonstra et al. (2007) montrent que la résistance en compression longitudinale augmente de manière importante alors que transversalement la résistance en compression augmente dans la direction tangentielle et diminue dans la direction radiale. Ces auteurs reportent aussi une diminution de la résistance en traction. Des résultats différents ont cependant été reportés par d'autres auteurs pour lesquels une diminution de la résistance en compression longitudinale lorsque les intensités de traitement augmentent a été remarquée (Unsal et Ayrilmis, 2005 ; Korkut et al., 2008).

Comme pour l'ensemble des propriétés du matériau étudiées, la raison des modifications des propriétés mécaniques est liée aux modifications chimiques. La dégradation des hémicelluloses et la cristallisation de la cellulose sont les principales causes de la diminution des propriétés mécaniques. Dans les faibles intensités de traitement, la cellulose amorphe est dégradée et subit une dépolymérisation (cf. § 3.3.2.3) qui affecte la résistance en traction si le degré de polymérisation (DP) devient inférieur à 300. L'influence de la cristallisation de la cellulose sur cette propriété mécanique n'est en revanche pas très nette (Boonstra, 2007).

Chapitre 1

Néanmoins il semblerait que la cellulose cristalline, de par sa structure très ordonnée et rigide, casse plus facilement que la cellulose amorphe en traction. Une augmentation de la cristallinité de la cellulose diminue donc la résistance en traction du bois. La rupture des liaisons secondaires (entre les hémicelluloses et entre les hémicelluloses et la cellulose) ainsi que la rupture des liaisons covalentes (entre les hémicelluloses et la lignine) dues à la dégradation des hémicelluloses diminue également la résistance du complexe polymérique et donc la résistance du bois en traction (LeVan et al., 1990). Les modifications des lignines ne sont pas impliquées dans les pertes de résistance en traction, il semblerait même que les réactions de réticulation augmentent la résistance en traction de ce polymère (Winandy et Rowell, 1984).

En compression, l'augmentation de la résistance dans la direction longitudinale est due à l'augmentation de la cristallinité de la cellulose très rigide et résistante dans cette direction. Cette rigidité est encore améliorée par les phénomènes de réticulation de la lignine qui rigidifient les fibrilles de cellulose (Sweet et Winandy, 1999) et qui limitent les mouvements perpendiculaires au fil apparaissant durant un essai dans cette direction. En compression radiale et tangentielle l'effet plutôt mauvais du traitement thermique est dû au fait que les fibrilles de cellulose orientées dans la direction longitudinale n'ont plus d'effet de rigidification dans ces directions (caractère anisotrope de la cellulose). La dégradation des hémicelluloses diminue la résistance du complexe hémicellulose-lignine et affecte donc également la résistance en compression du bois dans cette direction. Les phénomènes de réticulation de la lignine ont par contre un effet positif dans cette direction (Boonstra et al., 2006). Boonstra et al. (2006) ajoutent que la diminution de la résistance en compression dans la direction radiale est liée à l'apparition de petites fissures dans cette direction.

La dégradation des hémicelluloses est la principale responsable de la diminution de la résistance en flexion du bois traité thermiquement (Boonstra et al., 2006 ; Sweet et Winandy, 1999 ; LeVan et al., 1990). L'influence des modifications de la cellulose et de la lignine sur la résistance en flexion du bois n'est pas claire, des travaux complémentaires sont nécessaires. La diminution de la résistance du bois traité en flexion dynamique serait plutôt expliquée par la dégradation des hémicelluloses et notamment la rupture des liaisons secondaires entre cellulose et hémicellulose et des liaisons covalentes entre lignine et hémicelluloses (Davis et Thompson, 1964 cité par Boonstra et al., 2007). L'augmentation du taux de cellulose cristalline influence aussi négativement la résistance à la flexion dynamique. La dégradation des hémicelluloses et la cristallisation de la cellulose contribuent également à l'augmentation du module d'élasticité en flexion. La réticulation de la lignine semble également jouer un rôle important (Boonstra et al., 2007).

Le traitement thermique s'accompagne de modifications des propriétés thermoplastiques des composés du bois ce qui affecte ses propriétés mécaniques. La rupture des liaisons secondaires des hémicelluloses lors du traitement thermique entraîne une diminution de la

température de transition vitreuse des hémicelluloses et des lignines (Tg) et donc une plastification du bois qui affecte ses propriétés mécaniques (Placet, 2006).

Il est pour finir intéressant de noter que l'effet des défauts du bois (nœud, poches de résine, bois de réaction...) sur la résistance du bois est augmenté par le traitement thermique (Boonstra et al., 2006).

Aucune étude n'a en revanche été réalisée sur le comportement du bois traité thermiquement en compression dynamique seule. Bien qu'il aurait pu être intéressant de pouvoir confronter les résultats obtenus dans ce mémoire à de telles données, cela renforce d'autant l'intérêt de ce travail et son originalité.

3.3.4.4. Broyabilité

La diminution des propriétés mécaniques du bois traité thermiquement, très préjudiciable si le matériau est utilisé en construction, devient un atout indéniable et indispensable dans les processus de fabrication de biocarburants de seconde génération et notamment lorsqu'il s'agit de broyer le matériau. Wei et al. (2006) estime ainsi que les particules ne doivent pas dépasser les 200 μm afin d'éviter les problèmes de transferts thermiques lors des réactions de pyrolyse notamment. Bergman et al. (2005) estiment, eux, que la taille maximale des particules doit être de 100 μm car elle permet une coulabilité maximale du matériau durant son convoyage.

De nombreuses études ont évaluées la broyabilité du bois traité thermiquement. Dans la plupart de ces travaux le bois est injecté dans des broyeurs industriels et la broyabilité est évaluée par mesure de la consommation énergétique du broyeur pour arriver au produit final souhaité. Contrairement aux résultats présentés dans ce travail, la broyabilité n'est pas quantifiée sur un échantillon unique et ne prend pas en compte les variabilités liées au matériau telles que son caractère anisotrope ou la variation de densité entre cernes par exemple.

Repellin et al. (2010) montrent que l'énergie nécessaire à la broyabilité du bois (pin et sapin) pour obtenir des particules inférieures à 200 μm diminue lorsque l'intensité du traitement augmente. Jusqu'à des pertes de masse (intensités de traitement) proches de 8% cette diminution est importante, elle l'est moins pour des pertes de masse supérieures. Elle est maximale pour un traitement à 280°C pendant 5 min (perte de masse de 28%) où une diminution de 93% de la consommation énergétique du broyeur est observée. Les auteurs expliquent que cette diminution est due aux phénomènes physique et chimique apparaissant durant la torréfaction. Un mécanisme à deux étapes est proposé par ces auteurs. Une première étape (à basse température) de déshydratation du bois et de transformation physique (durcissement) de la lignine qui favorisent l'apparition de fissures et donc la broyabilité du matériau. La seconde étape (à températures plus élevées)

Chapitre 1

correspond à la dégradation des composés chimiques du bois qui fragilisent les parois cellulaires favorisant ainsi le broyage du matériau. Selon Repellin et al. (2010), 8% de perte de masse est l'intensité de traitement optimale puisqu'elle permet d'obtenir une réduction de consommation au broyage importante tout en conservant un rendement énergétique correct.

Bergman et al. (2005) ont étudié l'influence du traitement thermique sur la consommation énergétique nécessaire au broyage d'échantillons de saule torréfiés. Quelle que soit la taille des particules souhaitée, le traitement thermique permet une réduction de la consommation énergétique du broyeur. Cette consommation est minimale pour des traitements à 250°C pendant 30min et n'est pas diminuée lors de traitements plus intenses (270°C ; 30 min). Pour des tailles de particules de 200 µm, les auteurs obtiennent une réduction de 85% de la consommation énergétique du broyeur pour un traitement à 250°C pendant 30 mn. Bergman et al. (2005) ont également évalué la consommation énergétique du broyage d'échantillons de saule anhydres et humides (cf. § 2.2.3) afin d'évaluer l'influence des modifications chimiques d'une part et des modifications physiques dues au séchage d'autre part sur la broyabilité du matériau. De la même manière que Repellin et al. (2010), ils expliquent que la baisse de la consommation énergétique lors du broyage de saule traité thermiquement est due à l'effet combiné de ces deux mécanismes. Pour des températures supérieures à 250°C (durée de 30 min), l'influence de chacun des types de modifications est égale.

A puissance de broyage égale, la taille des particules formées dépend fortement de l'intensité de traitement. Repellin et al. (2010) montrent une relation de proportionnalité entre ses deux grandeurs. Almeida et al. (2009) ont réalisé une observation microscopique de particules obtenues après broyage de pin maritime et de hêtre traités thermiquement. Les échantillons natifs maintiennent leur structure fibreuse et présentent des arrachements de fibres qui peuvent être néfastes pour les systèmes d'aménagement de la biomasse car ils facilitent l'agglomération des particules. Les particules issues d'échantillons traités présentent en revanche des faciès de rupture nets empêchant une telle agglomération de particules.

De manière générale, Almeida et al. (2009) montrent que le ratio longueur/diamètre des particules diminue avec une augmentation des intensités de traitement. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Bergman et al. (2005) qui observent des particules plus sphériques après broyage de bois torréfié. Ces particules sphériques, particulièrement adaptées à l'injection dans les réacteurs (Bergman et al., 2005), sont également observées par Almeida et al. (2009) pour des traitements de 275°C (5 heures) (figure I-32). Les particules issues du broyage de bois moins traité conservent leur forme allongée en présentant cependant des extrémités arrondies.

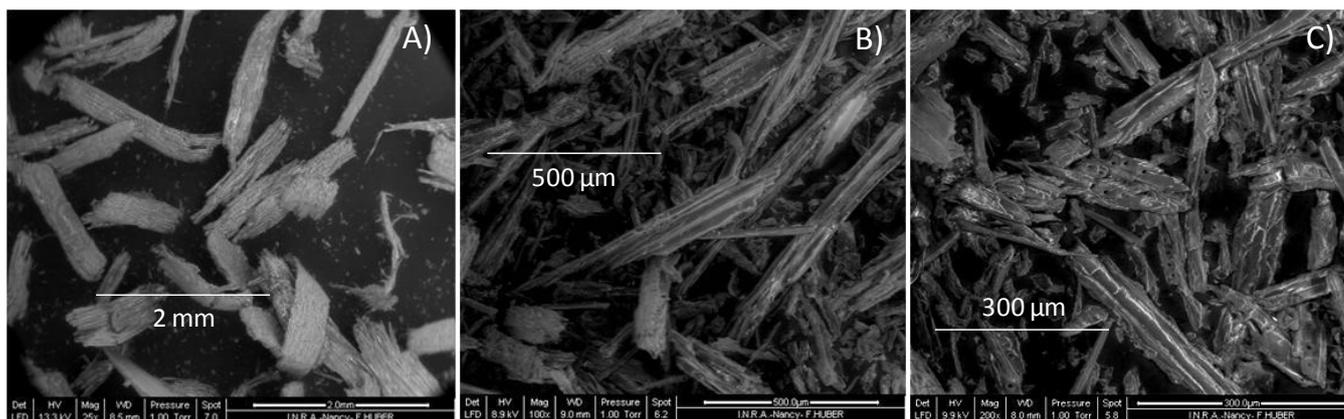


Figure I-32. Images ESEM des échantillons de *Pin maritime (Pinus pinaster)* après broyage : échantillons natif (A) et traité pendant 5 h à 250°C (B) et 275°C (C) (Almeida et al., 2009).

3.3.5. Autres propriétés

3.3.5.1. La couleur

Lorsque l'aspect visuel est privilégié, en décoration par exemple, la couleur du bois utilisé est un paramètre essentiel qu'il ne faut pas négliger. Elle peut alors être le facteur déterminant dans le choix d'une essence ou d'une autre. Le traitement thermique du bois change sa couleur. Plus le traitement s'intensifie, plus l'échantillon s'assombrit (Bourgoise et al., 1991 ; Behkta et Niemz, 2003) et maintient une distinction forte des éléments anatomiques de surface comme les limites de cernes par exemple. Le traitement thermique joue alors un rôle « visuel » en plus de ceux déjà connus. C'est la formation de produits de dégradation colorés provenant de la dégradation des hémicelluloses (Sundqvist, 2004, Sehlstedt-Persson, 2003) et des composés extractibles (Sundqvist et Morén, 2002) qui expliquent en partie les changements de couleur du bois. Certains auteurs utilisent même les changements de cette propriété comme indicateur d'intensité de traitement (Bourgois et al., 1991).

3.3.5.2. Mouillabilité, collage et finition

Les nombreuses études réalisées sur ce sujet montrent toutes que la mouillabilité du bois diminue lorsque les intensités de traitement augmentent. Hakkou et al. (2005) ont étudié la mouillabilité d'échantillons de hêtre traités à des températures allant de 20 à 240°C pendant 8 heures. Ces auteurs montrent que sur une plage de température comprises entre 120 et 160°C l'angle de contact augmente de 0 à 90°, une augmentation supplémentaire de température ne diminue pas davantage la mouillabilité. La diminution de la mouillabilité est en grande partie liée à une augmentation de la cristallinité de la cellulose (Pétrissans et al., 2003) et à un réarrangement des polymères pariétaux (Hakkou et al., 2005). Les réactions de dégradation de ces derniers ainsi que la formation des composés extractibles ne semblent

Chapitre 1

pas avoir d'influence, aucune relation entre une diminution de mouillabilité et perte de masse n'a d'ailleurs été établie (Hakkou et al., 2005). Cette diminution de mouillabilité, directement liée à une diminution de la tension de surface, fait que les produits de finition habituel ne peuvent être appliqués sur le bois traité thermiquement. Seuls des produits de finition aux formulations bien particulières peuvent être appliqués sur ce type de matériau.

L'influence du traitement thermique sur les propriétés de collage n'est pas si nette et dépend essentiellement du type de colle utilisé. Sernek et al (2008) ont étudié les propriétés de collage de plusieurs essences traitées thermiquement par le procédé Plato®. Plusieurs colles ont été utilisées et les résultats montrent que le traitement thermique affecte la résistance au cisaillement et la délamination des joints de collage. Les colles MUF (Mélamine Urée Formaldéhyde) et PUR (Polyuréthane) ont de meilleures propriétés de collage que les colles PRF (Phénol Résorcine Formaldéhyde).