

# Procédé de torréfaction

---

## 2.1 Généralités sur la torréfaction

La torréfaction est un procédé thermique traditionnellement appliqué au cacao et au café afin de libérer leurs essences aromatiques et d'affiner leur arôme. La torréfaction peut aussi bien concerner la biomasse ; il s'agit dans ce cas d'un processus de prétraitement thermique de la biomasse brute à des températures allant de 200°C à 300°C. Cette opération a généralement lieu sous conditions inertes (en présence d'azote) ou à faible concentration d'oxygène [37]. Elle est également appelée pyrolyse douce du fait que les conditions de ce prétraitement sont similaires à celles de la pyrolyse, qui opère, elle, à des températures entre 350°C et 650°C [83].

Le procédé de torréfaction permet d'améliorer la qualité de la biomasse brute en termes de densité énergétique, de broyabilité et d'hydrophobicité en vue de son utilisation dans les procédés thermo-chimiques de cogénération ou de gazéification. De plus, cette voie de prétraitement permet de faciliter le stockage et le transport de la biomasse [84, 22].

Dans certains procédés thermo-chimiques, la biomasse brute peut être substituée par des pellets de biomasse. Ces derniers possèdent une densité plus importante et des tailles plus petites que la biomasse brute. Ces caractéristiques sont en faveur du procédé de cogénération. Néanmoins, bien que l'humidité des pellets soit affaiblie, leur hygroscopicité reste élevée et leur teneur en énergie relativement faible (voir tableau 2.1).

D'autres parts, la torréfaction du bois, par exemple, produit un substrat hydrophobe et de densité énergétique plus importante et de propriétés physico-chimiques proches de celles du charbon [85]. Par conséquent, le produit torréfié constitue une matière première, de meilleure qualité que la biomasse non-traitée brute et le produit pelletisé pour les techniques de valorisation de la biomasse par cogénération et par gazéification [85] ou de co-combustion.

Récemment, de nombreux laboratoires et industries s'intéressent à la performance de la torréfaction de la biomasse pour des applications de type co-combustion. A l'échelle industrielle, une co-combustion de 2300 tonnes de pellets torréfiés a été réalisée avec suc-

TABLE 2.1 – Différentes propriétés des combustibles : bois, pellets de bois, pellets torréfiés, char et charbon [85]

	Wood	Wood pellets	Torrefied pellets	Charcoal	Coal
Moisture content (% wt)	30-45	7-10	1-5	1-5	10-15
Caloric value (Mj/kg)	9-12	15-16	20-24	30-32	23-28
Volatiles (% db)	70-75	70-75	55-65	10-12	15-30
Fixed carbon (% db)	20-25	20-25	28-35	85-87	50-55
Bulk density (kg/l)	0.2-0.25	0.55-0.75	0.75-0.85	~0.2	0.8-0.85
Volumetric energy density (GJ/m <sup>3</sup> )	2.0-3.0	7.5-10.4	15.0-18.7	6.0-6.4	18.4-23.8
Dust	Average	Limited	Limited	High	Limited
Hygroscopic properties	Hydrophillic	Hydrophillic	Hydrophobic	Hydrophobic	Hydrophobic
Biological degradation	Yes	Yes	No	No	No
Milling requirement	Special	Special	Classic	Classic	Classic
Handling requirement	Special	Easy	Easy	Easy	Easy
Product consistency	Limited	High	High	High	High
Transport cost	High	Average	Low	Average	Low

cès aux Pays-Bas. De plus, l'utilisation de la biomasse torréfiée en co-combustion décroît les émissions de CO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub>. La biomasse torréfiée est également une matière première intéressante pour le procédé de gazéification. De nombreuses études approuvent l'intérêt de sa substitution au substrat brut dans la production d'un syngaz de meilleure qualité contenant moins de goudrons. De plus, cette opération de prétraitement permet de diminuer la production de char. Par exemple, la gazéification de sciures de bois torréfiées a produit un syngaz de meilleure qualité qu'avec la même matière première brute [83]. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour une température de torréfaction de 250°C. En général, le rendement et la qualité du syngaz sont améliorés avec l'élévation de la température de torréfaction.

D'autres applications sont également attribuées à la biomasse torréfiée dans l'industrie de métallurgie et l'industrie du papier. Plusieurs études démontrent qu'il est possible de remplacer le charbon pulvérisé par du bois torréfiés à hauteur de 150 à 200 kg/t de métal pour la production de fer et d'acier. L'application de la biomasse torréfiée attire également le secteur du papier. Dans l'une des plus grandes compagnies de production de papier, des essais de co-combustion ont été conduits en mélangeant des pellets torréfiés à 25% (massique) au charbon pulvérisé. L'utilisation de la biomasse torréfiée a également fait ses preuves en production de céramique et de ciment. En effet, une compagnie canadienne projette de produire 25 000 tonnes de biomasse torréfiée par dans le but de remplacer le charbon dans les cimenteries [86].

Aujourd'hui, l'introduction de la biomasse torréfiée dans le secteur énergétique est principalement en phase de test. Les quantités de biomasse torréfiée ne sont pas représentatives face aux quantités de charbon mises en jeu. Les centrales de co-génération nécessitent d'importantes quantités de biomasse torréfiée, bien plus importantes que celles

produites dans l'industrie actuellement [86].

Par ailleurs, le caractère hydrophobe du bois torréfié réduit le risque d'auto-échauffement par voie biologique ou par condensation. En effet, des analyses de gaz réalisées sur des plaquettes de bois brutes et torréfiées montrent qu'une très faible quantité de gaz est émise pendant le stockage des plaquettes de bois torréfiées à 20°C, soit 1/3 des gaz produits pendant le stockage du bois brut [85]. Néanmoins, les propriétés de la biomasse torréfiée en termes de réactivité et de porosité l'exposent aux mécanismes exothermiques à l'origine de l'auto-échauffement ayant lieu à plus hautes températures.

## 2.2 Principe de la torréfaction

La torréfaction consiste à libérer des produits volatiles issus des matières fibreuses contenues dans la biomasse brute. Pour cela, une succession de réactions de dégradation des constituants des parois cellulaires du bois permettent de produire une biomasse riche en carbone [87], moins fibreuse, avec une hydrophobicité et une broyabilité plus élevées. Lors de la pyrolyse, la température s'étend de 400 à 700°C et provoque des réactions de dévolatilisation partielle à totale (entre 70% et 90% de perte de masse). La torréfaction étant réalisée à des températures moins élevées [200-300°C], la dévolatilisation est partielle avec des pertes de masses de 10 à 60 % [83].

Selon [84], il existe trois principaux types de torréfaction

- 1) Torréfaction sèche : réalisée dans un environnement inerte à température comprise entre 200 et 300°C, ce prétraitement, en entraînant des modifications structurales, physiques et chimiques de la biomasse brute, produit une biomasse possédant une densité énergétique plus élevée. Ainsi, à travers différentes réactions chimiques de décomposition des constituants des parois cellulaires de la biomasse lignocellulosique [87], les propriétés suivantes sont améliorées : (i) le pouvoir calorifique et la densité énergétique sont accrus (ii) les ratios O/C et H/C sont réduits (iii) l'hydrophobicité est plus élevée (iv) la broyabilité est supérieure (v) l'uniformité des propriétés est augmentée [83].
- 2) Torréfaction humide ou prétraitement hydrothermal : ce procédé s'intéresse au traitement de la biomasse humide dans une eau surpressée, comme par exemple les boues d'épuration, le fumier et les microalgues [87]. Contrairement à la torréfaction sèche, ce prétraitement est suivi d'une filtration et d'un séchage, sauf dans le cas du prétraitement avant attaque enzymatique. Les travaux de [84, 88, 89] montrent que la densité énergétique est plus élevée après torréfaction humide qu'après torréfaction sèche dans des conditions de température à hauteur de 260°C dans une eau surpressée à 5MPa. Néanmoins, la torréfaction humide exige une importante pression du milieu. Ceci entraîne un coût d'équipement plus élevé.

- 3) Torréfaction ionique : elle consiste à imprégner la biomasse avec un liquide ionique. Cette technique améliore la torréfaction de la cellulose à des températures inférieures à 300°C. Cependant, la torréfaction ionique produit une biomasse de faible pouvoir calorifique comparée à la torréfaction sèche. Aussi, le recours aux liquides ioniques implique des dépenses supplémentaires [84]

Dans ce document, l'intérêt est porté sur la torréfaction sèche de la biomasse lignocellulosique. Les étapes qui la constitue sont décrit ci-après.

### 2.2.1 Étapes de la torréfaction sèche

Le processus de torréfaction comprend plusieurs étapes (fig. 2.1) ; chaque étape est associée à une plage de température et à des temps de séjour [35].

- Le chauffage : avant le séchage, le flux de chaleur introduit fait augmenter la température de la biomasse jusqu'à ce que l'humidité de l'échantillon commence à s'évaporer à la fin de cette étape.
- Le pré-séchage : lorsque la température est comprise entre la température ambiante et 100°C, l'eau libre s'évapore sans réagir.
- L'après-séchage : à plus hautes températures (150-200°C) l'eau liée est libérée entraînant une certaine perte de masse.
- La torréfaction : au cours de ce processus, les constituants lignocellulosiques de la biomasse subissent différentes réactions partielles de dépolymérisation, dévolatilisation et de carbonisation. La torréfaction transforme les polymères complexes en monomères qui se transforment en gaz volatiles condensables et non-condensables. La dévolatilisation se produit à température supérieure à 200°C, et se caractérise par la libération de l'oxygène et des matières volatiles contenues dans la biomasse.
- Le refroidissement : Une fois la charge torréfiée et stabilisée, le milieu est refroidi à la température ambiante.

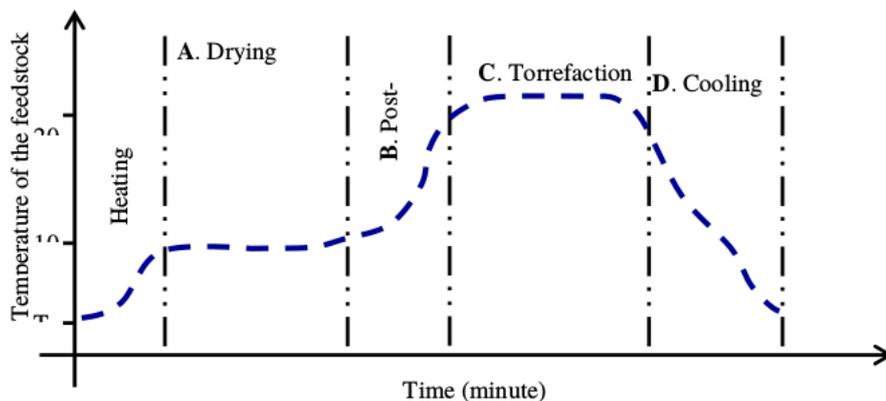


FIGURE 2.1 – Étapes du procédé de prétraitement de la biomasse par torréfaction [87]

Par ailleurs, il est important de connaître la composition cellulaire des parois de la biomasse, afin de mieux comprendre le comportement de ses constituants vis-à-vis du procédé de torréfaction [87].

## 2.3 Composition de la biomasse lignocellulosique

La nature fibreuse de la biomasse lignocellulosique vient de la structure complexe des polymères qui constituent la paroi cellulaire [90]. Les principaux constituants de la biomasse lignocellulosique sont : l'hémicellulose (40-20%), la cellulose (25-35%) et la lignine (16-33%). La figure 2.2 montre la structure de la paroi cellulaire du bois et de ses principaux constituants.

**L'hémicellulose** : essentiellement composée d'hétéropolysaccharides comme les hexoses et les pentoses. L'hémicellulose a une structure amorphe aléatoire qui la rend thermiquement instable. L'hémicellulose est un constituant très réactif, sujet à des réactions de dégradation (par décomposition et dévolatilisation). C'est le composant qui contribue le plus à la perte de masse au cours de la torréfaction, et qui peut également améliorer la dégradation de la cellulose grâce à la vapeur d'eau et aux acides qu'il produit lors de sa dégradation [87]. Toutefois, l'hémicellulose permet de préserver la structure géométrique du bois, en liant les fibres de la cellulose entre elles. De ce fait, sa dégradation ébranle la géométrie du bois qui devient très friable, assurant une meilleure broyabilité [91].

**La cellulose** : la cellulose est un polymère constitué d'une longue chaîne de molécules de glucose ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>. Les chaînes de cellulose sont liées entre elles par des liaisons d'hydrogène entre groupements hydroxyles, formant des faisceaux appelés microfibrille. La microfibrille comprend deux parties : cristalline et amorphe. La région cristalline est caractérisée par des chaînes ordonnées et périodiques liées par des liaisons hydrogène. Alors que la partie amorphe de la cellulose est constituée de chaînes de celluloses désordonnées qui peuvent établir des liaisons avec l'eau ou d'autres molécules. La cellulose possède, de par sa nature semi-cristalline, une structure plus résistante que l'hémicellulose.

**La lignine** : est un polymère tridimensionnel, principalement constitué de liaisons C-O-C et C-C. La lignine est plus stable thermiquement que les autres constituants de la biomasse lignocellulosique. Elle se dégrade plus lentement sur une plus large plage de température (200-500°C) [92]. Durant la pyrolyse de la lignine à 10°C/min, en dessous de 700°C, la lignine se décompose très lentement induisant une perte de masse de seulement 40 wt% par rapport à sa masse initiale [92]. La torréfaction ne permet donc pas sa dégradation. Sa forte teneur en carbone fait que la lignine apporte de la rigidité à la biomasse, une imperméabilité à l'eau et une résistance à la dégradation. De ce fait, la biomasse

torréfiée reste relativement riche en carbone, ce qui augmente sa densité énergétique.

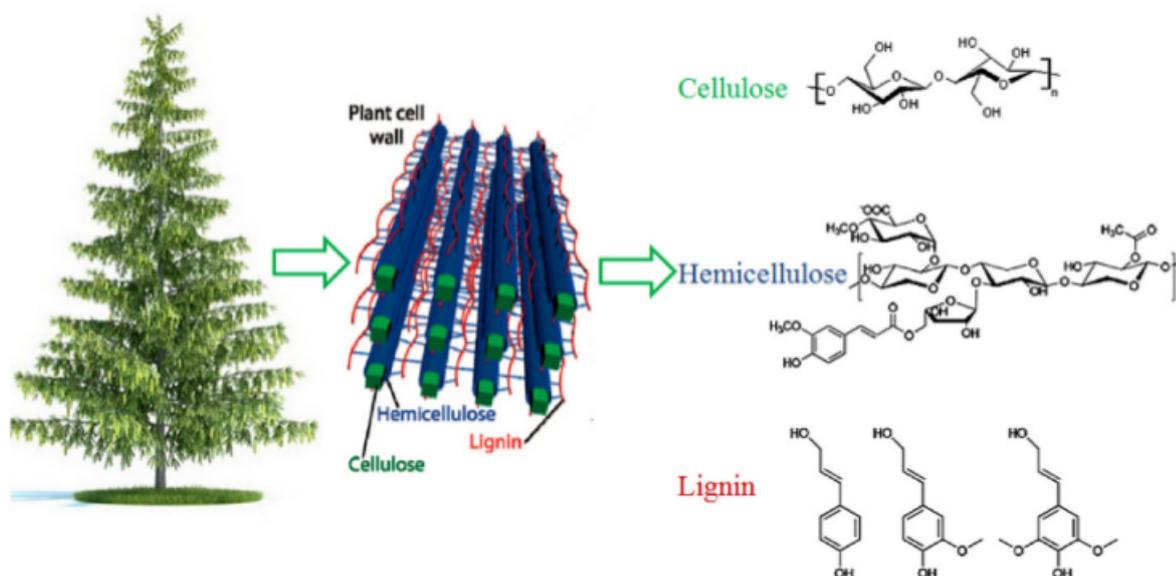


FIGURE 2.2 – Structure de la paroi cellulaire du bois et de ses principaux constituants [93]

## 2.4 Caractérisation et méthodes d'étude

Différentes approches sont adoptées dans le but de caractériser et d'optimiser le procédé de torréfaction. Des analyses immédiate et élémentaire aux modèles décrivant la cinétique de torréfaction en passant par l'évaluation du rendement énergétique, ces approches sont introduites ci-dessous.

### 2.4.1 Analyses immédiate et élémentaire

Au cours du procédé de torréfaction, la structure complexe polymérique de la biomasse est dégradée en monomères, qui sont à leur tour dégradés en produits volatiles condensables et non condensables. Les analyses immédiate et élémentaire permettent de caractériser la composition physico-chimique du produit torréfié.

#### Humidité

La torréfaction réduit l'humidité de la biomasse à hauteur d'environ 50 à 70 % [83]. De plus, du fait de la rupture des liaisons d'hydrogène pendant la phase de séchage réactif, le produit torréfié devient hydrophobe. Ainsi, la faible teneur en eau de la biomasse torréfiée améliore l'efficacité des procédés thermo-chimiques de conversion de la biomasse. De plus,

TABLE 2.2 – Propriétés de la biomasse brute, de la biomasse torréfiée et du charbon [83]

Material	Volatile Matter (wt%)	Fixed Carbon (wt%)	Higher heating Value (MJ kg <sup>-1</sup> )
Raw biomass	67-88	0.5-20	15-20
Torrefied biomass	34-85	13-45	16-29
Coal	0.5-50	46-92	25-35

la réduction de la teneur en eau assure une meilleure stabilité de la matière pendant son stockage tout en limitant les risques de dégradation biologique.

### Matière volatiles, carbone fixe et ratios atomiques (O/C, O/H)

L'analyse immédiate renseigne sur la variation de la teneur en matière volatiles, du carbone fixe, des ratios atomiques O/C et O/H et du pouvoir calorifique supérieur. La dévolatilisation partielle caractérisant la torréfaction diminue la teneur en matières volatiles au profit du carbone fixe (voir tableau 2.2). En effet, les teneurs en matières volatiles et en carbone fixe varient entre 34 à 85% et 13 à 45%, respectivement. En intensifiant la torréfaction, les matières volatiles décroissent linéairement en fonction du carbone fixe.

Les matières volatiles libérées pendant la torréfaction incluent principalement l'oxygène et l'hydrogène. Par conséquent, les ratios atomiques O/C et H/C diminuent de 0.4-0.8 à 0.1-0.7 pour O/C et entre 1.2-2 et 0.7-1.6 pour H/C. Il en découle une hausse de la densité énergétique. Le diagramme de Van Krevelen illustré dans la figure 2.3 met en avant la tendance décroissante quasi-linéaire du ratio H/C en fonction de O/C de la biomasse non-traitée au charbon en passant par la biomasse torréfiée.

### 2.4.2 Rendement massique de la torréfaction

Le rendement massique du produit solide est défini comme étant le ratio de la masse de la biomasse torréfiée et de la masse initiale de la biomasse non-traitée, sur base sèche, ou sur base sèche ne contenant pas de cendre. Le rendement du produit torréfié diminue suite à la libération des matières volatiles contenues dans la biomasse. Cette baisse s'accroît avec la température de torréfaction et la durée de ce prétraitement.

Les produits générés sont constitués de matières condensables et non-condensables. Les matières volatiles condensables contiennent majoritairement de l'acide acétique et de l'eau. Celles-ci dérivent de la décomposition de l'hémicellulose [35]. Les matières non-condensables sont quant à elles composées principalement de CO<sub>2</sub> et de CO. Il a été démontré que le rendement massique de production de substrat torréfié dépend de sa teneur en hémicellulose. Pour une biomasse de teneur en hémicellulose plus importante, le rendement massique du produit torréfié est plus faible [87].

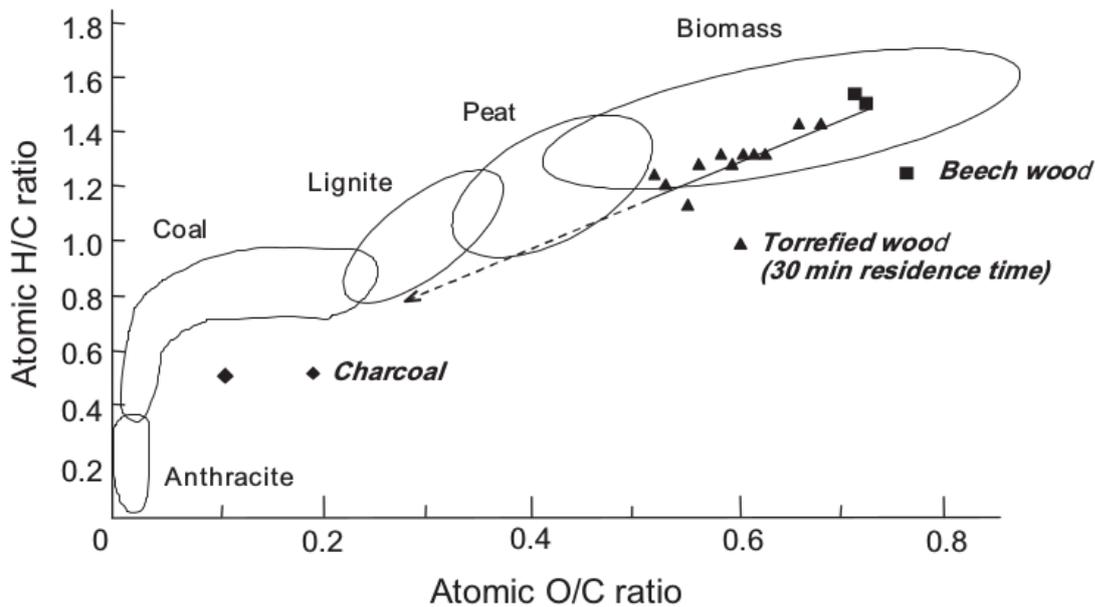


FIGURE 2.3 – Diagramme de Van Krevelen [35]

### 2.4.3 Pouvoir calorifique supérieur et rendement énergétique

L'objectif principal de la torréfaction est d'intensifier le potentiel énergétique de la biomasse en termes de pouvoir calorifique et de densité énergétique. Comme le montre le tableau 2.2, la hausse du carbone fixe s'accompagne d'une élévation du PCS de la matière prétraitée qui se rapproche de celui du charbon. Le facteur dit d'amélioration énergétique est un indicateur de la densité énergétique du produit torréfié. Il est défini sur la base du ratio du PCS de la biomasse torréfiée et celui de la biomasse avant torréfaction. Ce facteur est logiquement supérieur à 1, et peut aller jusqu'à 1.4 [83].

Le PCS est classiquement mesuré à l'aide d'une bombe calorimétrique. Seulement, l'incertitude de mesure associée est estimée à  $\pm 240 \text{ kJ/kg}^{-1}$ , ce qui équivaut à une incertitude de  $\pm 1.5\%$ , et le pourcentage d'incertitude du rendement énergétique est de  $\pm 3\%$  [94]. Afin de limiter ces incertitudes, d'autres approches sont adoptées en définissant des corrélations exprimées en fonction des fractions massiques des éléments constituant le bois (H, O, S, N, cendre), ou en fonction de la teneur en MV et en CF, ou bien encore en se basant sur la teneur en lignine (tableau 2.3).

Le modèle de la thermochimie de la torréfaction du saule conçu par Bates et Ghoniem est basé sur des corrélations de PCS développées pour le charbon, et une corrélation basée sur le traitement de 122 échantillons de biomasse [99, 94].

Le rendement énergétique de la torréfaction est défini comme étant le ratio de la te-

TABLE 2.3 – Différentes corrélations proposées pour le calcul du PCS de la biomasse

Correlation(HHV,MJ kg <sup>-1</sup> )	Reference
HHV = 0.3536FC+0.1559VM-0.0078Ash	Parikh et al. [95]
HHV=0.3491C+1.1783H+0.1005S-0.1034O-0.0151N-0.0211Ash	Channiwala and Parikh [96]
HHV=0.0893Lignin+16.9742(for wood biomass)	Dermibas [97]
HHV = 0.0877Lignin+16.4951(for non-wood biomass)	Dermibas [97]
HHV=0.2949C+0.8250H	Yin [98]
HHV=0.2521FC+0.1905SVM	Yin [98]

neur en énergie de la matière torréfiée et de la matière brute. Autrement dit, ce critère de torréfaction est le résultat de la multiplication du rendement massique de la torréfaction par le facteur d'amélioration du PCS précédemment abordé. L'intensification des conditions de torréfaction, qu'elle soit basée sur la température ou sur la durée de prétraitement, affaiblie le rendement énergétique linéairement avec la baisse du rendement massique, bien que parallèlement la densité énergétique augmente [83, 87]. Le rendement énergétique dépend également du type de la biomasse. La torréfaction d'une biomasse de teneur élevée en lignine produit un substrat plus énergétiquement dense, et de rendement massique et énergétique supérieurs.

#### 2.4.4 Surface spécifique et réactivité

D'une part, par l'évaporation de l'humidité et la libération des matières volatiles, la torréfaction réduit l'hétérogénéité de la biomasse, et facilite ainsi le stockage de la matière. D'autres parts, ce prétraitement augmente sa porosité et sa surface spécifique, et amoindri par conséquent sa densité. La surface spécifique de la biomasse torréfiée peut être influencée soit par la température ou la durée du prétraitement. En effet, dans [16], la surface spécifique de l'écorce de bois résineux augmente à une température de torréfaction minimale et à une durée maximale. Pour le cas de sciure de bois résineux, il faudrait imposer une température maximale, indépendamment de la durée du prétraitement, pour étendre la surface spécifique. Parallèlement, la réactivité de la biomasse est intensifiée. Ce critère serait le principal responsable des réactions exothermiques spontanées pouvant affecter le substrat torréfié stocké.

#### 2.4.5 Cinétique réactionnelle au cours de la torréfaction

La description cinétique des mécanismes caractérisant la torréfaction consiste à prédire la décomposition des composantes de la biomasse par trois méthodes distinctes : par la modélisation de la décomposition des pseudo-composantes [100, 101, 102, 103, 104] ou des principales composantes lignocellulosiques (hémicellulose, cellulose, lignine) consti-

tuant la biomasse au cours de la torréfaction [105, 106, 38, 107, 108] ou plus récemment par l'approche de modélisation des énergies d'activation [109, 110, 111, 112, 113].

La dégradation des pseudo-composantes de la biomasse au cours du processus de torréfaction est généralement représentée par deux étapes de réactions compétitives [103, 90, 94]. La première étape correspond à des réactions rapides et exothermiques de dégradation de l'hémicellulose. La seconde étape correspond, quant à elle, à des réactions lentes endothermiques ou/et exothermiques du reste des constituants lignocellulosiques les moins instables thermiquement. Des matières volatiles sont générées à l'issue de la dégradation de la biomasse dans chacune des deux étapes.

### 2.4.6 Chaleur de réaction de torréfaction

Endothermiques, exothermiques ou les deux combinées, les chaleurs de réaction déterminées expérimentalement présentent de grandes incertitudes. Celles-ci ont pour origines la taille de l'échantillon, les impuretés et la nature de l'atmosphère [105]. Les enthalpies de réaction retenues dans la littérature sont les suivantes : pour le bois -2300 à 418 kJ/kg, pour la cellulose de -510 à 322 kJ/kg, lignine -455 à 79 kJ/kg et pour l'hémicellulose de -700 à 42 kJ/kg [114]. Les différentes méthodes utilisées pour évaluer les enthalpies de réactions sont résumées dans le tableau 2.4.

Dans le modèle de Turner et al [105], à taux de chauffe fixé à 5°C/min jusqu'à 370°C, les valeurs d'enthalpie attribuées à la dégradation des composantes lignocellulosiques du bois sont de 150 kJ/kg et -233 kJ/kg pour la cellulose et la lignine, respectivement, et l'enthalpie de réaction de l'hémicellulose a été ajustée à -850 kJ/kg.

Une autre approche de détermination des chaleurs de réactions de la pyrolyse [94] est fondée sur l'estimation du pouvoir calorifique supérieur sur la base des corrélations précédemment abordées.

$$-PCS = \sum_{\text{produits}} \nu_i H_{f,i}^{\check{r}} - \sum_{\text{réactifs}} \nu_i H_{f,i}^{\check{r}} \quad (2.4.1)$$

Avec :  $H_{f,i}^{\check{r}}$  est l'enthalpie standard de formation des produits et des réactifs,  $\nu_i$  est le nombre de moles de produits ou de réactifs par moles de matière première réactive.

Le modèle basé sur le bilan énergétique conçu par Bates et Ghoniem [94] estime une chaleur de réaction comprise entre 40 et 280 kJ/kg pendant la première étape. Cependant, pour la seconde étape l'exothermicité de la réaction dépend de la température et de la corrélation retenue.

TABLE 2.4 – Méthodes de détermination du PCS du bois lors de la pyrolyse et de la torréfaction [94]

Enthalpy of reaction	Temperature (°C)	Feedback	Method	Source
$87 \pm 449$ kJ/kg <sub>biomass</sub>	250	Willow	ASTM bomb calorimetry	Prins [103]
$150 \pm 1350$ kJ/kg <sub>biomass</sub>	230-280	Beech	Estimated through analysis of products and reactant	van der Stelt [35]
0 to -200 kJ/kg <sub>biomass</sub>	200-280	Beech	Deduced from experimental data with simplified single particle model	van der Stelt [35]
-199 to 148 kJ/kg <sub>biomass</sub>	270-300	Beech	Deduced from experimental data with continuous screw reactor	Ohliger et al. [115]
-293 to 1673 kJ/kg <sub>mass loss</sub>	275-470	Beech	Deduced from experimental data with single particle model	Roberts and Clough [116]
200.8 kJ/kg <sub>mass loss</sub>	470	Beech	Deduced from experimental data with single particle model	Kung and Kalekar [117]
255 to -20 kJ/kg <sub>mass loss</sub>	300-600	Wood sawdust	Deduced from experimental data with single particle model	Koufopoulos et al. [118]
255 kJ/kg	200-850	(Various)	Deduced from experimental data with single particle model	Haseli et al. [119]
25 kJ/kg <sub>char,tar,gas</sub> -55.3 to -176 kJ/kg <sub>biomass</sub>	100-600	Pine, oak, sawdust	Deduced from experimental data with model of packed sawdust reactor	Strezov et al. [120]

## 2.5 Positionnement de l'étude

Bien qu'un bon nombre de travaux se soient penchés sur l'étude de l'auto-échauffement du charbon, les mécanismes gouvernant son oxydation à basse température ne sont toujours pas complètement compris.

Se présentant comme le charbon du futur, le bois torréfié fait l'objet de peu de travaux de recherche dédiés aux mécanismes intervenant à son contact avec l'oxygène. Dans le présent travail, il est question de caractériser les situations d'auto-échauffement pouvant intervenir pendant le refroidissement oxydant du bois torréfié.

La plupart des travaux traitant de l'auto-échauffement sont réalisés à petite échelle par exemple, par analyse thermogravimétrique, calorimétrie. Cette échelle ne permet pas de tenir compte de la réalité des transferts intervenant en industrie, par exemple dans un silo subissant un auto-échauffement. Dans le but de représenter de façon plus réaliste cette problématique, des scénarii d'auto-échauffement sont créés dans un réacteur à lit fixe de 12 L.

Dans la littérature, uniquement le processus de chimisorption a été associé au gain de masse observé au début de l'oxydation à basse température du bois sévèrement torréfié sans quantifier la chaleur de réaction associée [39]. Ainsi, nous nous sommes penchés sur l'investigation des mécanismes impliqués dans la production spontanée de chaleur pendant l'oxydation du hêtre torréfié à basse température.

Par ailleurs, peu de modèles numériques sont proposés dans le but de décrire, à l'échelle du réacteur, la cinétique chimique aux transferts de masse et de chaleur au cours de l'auto-échauffement du bois prétraité. Ainsi, nous avons conçu un modèle qui décrit à la fois la cinétique de consommation d'oxygène et les transferts conductif et convectif. Finalement, ce modèle a été extrapolé à l'échelle industrielle afin de simuler le comportement thermique d'un silo de stockage au cours de l'auto-échauffement.

DEUXIÈME PARTIE

# Approche expérimentale de l'auto-échauffement

---

