



**HAL**  
open science

## Influence de l'épaisseur de particule sur l'homogénéité de traitement thermique d'un bois de peuplier

John Pachón-Morales, Julien Colin, Floran Pierre, François Puel, Patrick Perré

### ► To cite this version:

John Pachón-Morales, Julien Colin, Floran Pierre, François Puel, Patrick Perré. Influence de l'épaisseur de particule sur l'homogénéité de traitement thermique d'un bois de peuplier. 16ème Congrès de la Société Française de Génie des Procédés SFGP 2017, Jul 2017, Nancy, France. hal-01661843

**HAL Id: hal-01661843**

**<https://hal.science/hal-01661843v1>**

Submitted on 12 Dec 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Influence de l'épaisseur de particule sur l'homogénéité de traitement thermique d'un bois de peuplier**

PACHÓN-MORALES John<sup>a\*</sup>, COLIN Julien<sup>a</sup>, PIERRE Florian<sup>a</sup>, PUEL François<sup>a</sup> et PERRÉ Patrick<sup>a</sup>

<sup>a</sup>LGPM, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay  
Grande Voie des Vignes, 92295 Châtenay-Malabry, France

### **Résumé**

La chaîne de procédés de transformation de biomasse en biocarburants 2G par voie BtL débute par des opérations de prétraitement. La torréfaction, consistant en une pyrolyse douce de la biomasse, permet de réduire le caractère fibreux et résilient de la biomasse et de diminuer son hygroscopicité, ce qui rend les opérations de broyage en aval moins énergivores et facilite le stockage. À l'issue du procédé de torréfaction, l'uniformité du traitement au sein de la biomasse est fondamentale pour garantir l'obtention d'un produit avec des caractéristiques homogènes en termes de densité énergétique, composition chimique et propriétés mécaniques. Le travail présenté vise à étudier les effets de l'épaisseur des particules de biomasse et de l'intensité de traitement thermique sur l'homogénéité de la torréfaction. Cette étude s'appuie sur des profils de température au cœur des échantillons, ainsi que des relevés de la perte de masse et des analyses élémentaires localisées. Une augmentation de l'amplitude des pics exothermiques avec l'épaisseur de traitement et la température de torréfaction est constatée. Des effets de l'épaisseur des particules sur la perte de masse sont aussi observés. L'homogénéité du traitement thermique au sein des particules est le résultat d'un équilibre entre le flux de chaleur provenant de la source externe, le réacteur de torréfaction, et celui libéré au sein des particules par les réactions exothermiques de dégradation.

**Mots-clés :** BtL, torréfaction, analyse élémentaire, perte de masse globale, pic exothermique, peuplier

### **1. Introduction**

Dans une filière BtL de production de biocarburants, la torréfaction est considérée comme étant un des prétraitements nécessaires les plus avantageux. Ce procédé, qui consiste en un traitement thermique de la biomasse à pression atmosphérique, en absence d'oxygène et à des températures entre 200 °C et 300 °C, permet de produire un solide présentant des caractéristiques intermédiaires entre biomasse native et charbon de bois. La biomasse torréfiée présente une hygroscopicité et une résilience mécanique inférieures à celles de la biomasse native, ainsi qu'un contenu énergétique et une résistance à la dégradation biologique supérieurs (Almeida et al., 2008). La biomasse traitée thermiquement est également plus uniforme que la biomasse non-traitée : des biomasses lignocellulosiques torréfiées d'origine différentes acquièrent des propriétés physiques et chimiques similaires (Bergman et al., 2005). Tous ces effets de la torréfaction sur la biomasse lignocellulosique induisent une réduction importante des consommations énergétiques liées aux procédés de broyage en aval, ainsi que la facilitation du stockage (Repellin et al., 2010), (van der Stelt et al., 2011).

Garantir l'homogénéité du traitement thermique au sein des particules de biomasse est nécessaire de manière à s'assurer que les propriétés seront celles attendues et, de ce fait, pouvoir modéliser le procédé pour mieux le contrôler et l'optimiser.

Deux phénomènes successifs peuvent être à l'origine de l'hétérogénéité de la biomasse torréfiée à l'échelle de la particule. En premier lieu, la résistance thermique au transfert de chaleur de la surface vers le cœur tant que l'atmosphère est plus chaude que la particule et, deuxièmement, la résistance thermique à travers le matériau pour l'évacuation du cœur vers la surface de l'énergie produite lorsque des réactions exothermiques de dégradation de la biomasse sont thermo-activées. La combinaison de ces deux

---

\* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : john.pachon@centralesupelec.fr

phénomènes génère des profils de température sur l'épaisseur du matériau et donc un traitement thermique hétérogène.

En effet, des études par analyse thermique différentielle (DTA) ont démontré la présence des réactions exothermiques de dégradation lors de la torréfaction de la biomasse lignocellulosique (Chen & Po-Chih, 2011 ; Cavagnol et al., 2015). Pendant la torréfaction, l'oxygène présent dans les hémicelluloses est partiellement consommé, donnant ainsi lieu au comportement exothermique (Chen & Po-Chih, 2011).

Le but de ce travail est de caractériser précisément les effets de l'épaisseur des particules de biomasse et de l'intensité de traitement thermique (temps, température) sur l'homogénéité de la torréfaction. De ce fait, une taille optimale des particules qui assure une bonne homogénéité du traitement dans l'échantillon pourra être établie.

## **2. Matériels et méthodes**

### **2.1 Matériel végétal**

Des échantillons de peuplier (*Populus euro-americana* 'Koster') ont été usinés dans un arbre de 25 ans provenant d'une plantation de la Vallée de la Suippe, à Auménancourt-le-Petit, Grand-Est, France. L'arbre a été débité sur plots avant séchage.

### **2.2 Préparation des échantillons**

Les dimensions des échantillons sont 80×60 mm<sup>2</sup> dans les directions tangentielle et longitudinale, respectivement, et 10, 12, 15, 17 et 20 mm dans la direction radiale (épaisseur). Ces échantillons ont été découpés dans la direction longitudinale d'une même planche de manière à limiter les effets dus à la variabilité biologique au sein de l'arbre. Cette précaution permet d'interpréter les différences constatées comme provenant des différences de conditions opératoires.

### **2.3 Conditions de torréfaction et mesure de la perte de masse**

Les échantillons ont été traités thermiquement au moyen d'un dispositif batch développé au laboratoire et dédié à la torréfaction de la biomasse. Le four de traitement est une étuve *Memmert UFP400* ayant un volume utile de 53 L. Des résistances chauffantes sont régulièrement réparties au niveau de la base, du plafond et des parois latérales du caisson. L'étuve est pourvue d'un système de contrôle PID de la température. La convection de l'atmosphère de l'étuve est forcée par un ventilateur centrifuge vertical situé sur la paroi du fond. L'étanchéité de l'enceinte est assurée par nos soins : le balayage par un flux en continu d'azote (5 l.min<sup>-1</sup>) permet de garantir une concentration d'oxygène inférieure à 1,5 % (Colin, 2007). Cette teneur est mesurée sur le gaz de balayage en sortie d'étuve. Un logiciel d'acquisition a été développé afin i) de prendre la main sur le PID de l'étuve de façon à reproduire rampe de montée et durée de plateau souhaitées et ii) de sauvegarder sur fichier les températures des différents échantillons et les conditions réelles de l'étuve.

Trois intensités de traitement ont été testées : trois niveaux de température de 240 °C, 260 °C et 280 °C pendant 1 heure. Le protocole suivi est le suivant : **a.** chauffage de la température ambiante (environ 20 °C) à une vitesse de 10 °C.min<sup>-1</sup> jusqu'à 100 °C ; **b.** plateau à 100°C (période de séchage) pendant 24 heures ; **c.** chauffage à 10 °C.min<sup>-1</sup> jusqu'à la température de traitement ; **d.** plateau à la température de traitement pendant 1 heure ; **e.** refroidissement grâce aux pertes thermiques et au flux d'azote balayant le four.

Pour chaque traitement, dix échantillons (deux de chaque épaisseur) ont été traités. Les échantillons sont instrumentés avec des thermocouples type K (0,5 mm de diamètre) de manière à mesurer leur température à cœur, comme montré en figure 1.

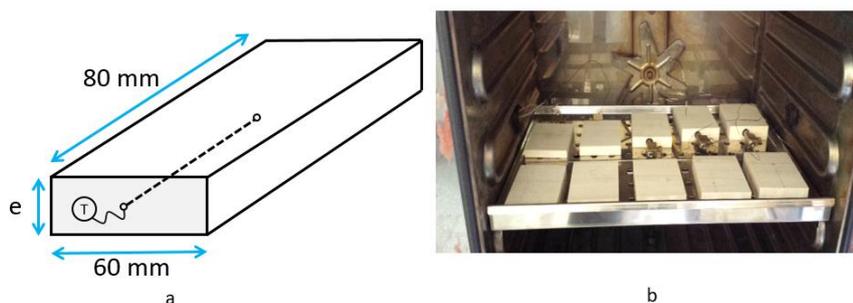


Figure 1. a. Instrumentation des échantillons (thermocouple à cœur) et b. Disposition dans le four de torréfaction.

La perte de masse globale est utilisée pour caractériser l'intensité du traitement thermique subi par la biomasse du fait de son caractère synthétique de la température et de la durée de traitement (Almeida, et al., 2009). On se réfère à la perte de masse anhydre, (*anhydrous mass loss, ML*), n'intégrant pas de l'eau libérée pendant la phase de séchage :

$$ML(\%) = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \cdot 100 \quad (1)$$

Où  $m_0$  et  $m_t$  sont les masses anhydres initiale et finale (après torréfaction), respectivement.

#### 2.4 Analyse élémentaire CHNS/O

Des échantillons de 2 mm d'épaisseur ont été prélevés sur la surface et le cœur des plaquettes traitées et broyés dans un broyeur à billes *Retsch MM400*, dans le but d'obtenir une poudre adaptée à l'analyse élémentaire.

Un analyseur élémentaire CHNS/O Flash 2000 (*ThermoFischer Scientific®*) a été utilisé pour établir la composition des échantillons traités thermiquement. L'analyse de C, H, N et S est réalisée par combustion dynamique « flash » de l'échantillon à 930 °C à l'aide d'un catalyseur de  $V_2O_5$ . L'analyse d'oxygène utilise une pyrolyse de l'échantillon à 1000 °C. Les produits gazeux des réactions sont ensuite séparés par chromatographie GC et quantifiés grâce à un catharomètre.

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1 Profils de température

Les résultats de la figure 2 montrent les évolutions des températures à cœur des échantillons pour une température de traitement de 280 °C. On retrouve un comportement similaire des profils pour tous les niveaux de température étudiés. La présence d'un pic exothermique au cœur pour toutes les épaisseurs étudiées est constatée. Ceci confirme la présence des réactions exothermiques de dégradation des hémicelluloses aux températures étudiées. De même, on constate que l'amplitude du pic de température augmente avec l'épaisseur de l'échantillon du fait de l'augmentation de la résistance au transfert de chaleur vers le gaz, ce qui augmente la température à cœur et active d'autant plus les réactions exothermiques. Pour une épaisseur de 20 mm à 280°C, cela se traduit par une température à cœur supérieure de 20°C à celle du gaz de l'étuve (Figures 2 et 3).

Dans les premiers instants de la montée en température, la chaleur est transférée depuis le gaz vers la surface de l'échantillon et de la surface vers le cœur. Quand le cœur atteint une température suffisante pour activer les réactions exothermiques de dégradation, le sens du flux de chaleur est inversé, vers la surface de la plaquette.

La diffusivité thermique ou coefficient de diffusion thermique,  $\alpha$ , exprimé en  $m^2 \cdot s^{-1}$  est dimensionnellement équivalent au rapport du carré d'une longueur caractéristique  $l$  et d'un temps caractéristique de diffusion  $\tau_c$  :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C} \propto \frac{l^2}{\tau_c} \quad (2)$$

Le temps caractéristique représente donc le temps nécessaire au transfert d'une quantité de chaleur sur une distance  $l$  dans un matériau à diffusivité thermique  $\alpha$  (Crank, 1975). L'augmentation de l'épaisseur des échantillons est un frein à l'évacuation de la chaleur entraînant alors la formation d'un pic exothermique plus important. Comme montré en figure 3, pour une épaisseur donnée, cette exothermicité est d'autant plus importante que la température de torréfaction augmente. Les deux phénomènes (conduction de chaleur et réactions exothermiques) sont donc liés et l'homogénéité du traitement thermique dans l'épaisseur dépend donc de leur importance relative.

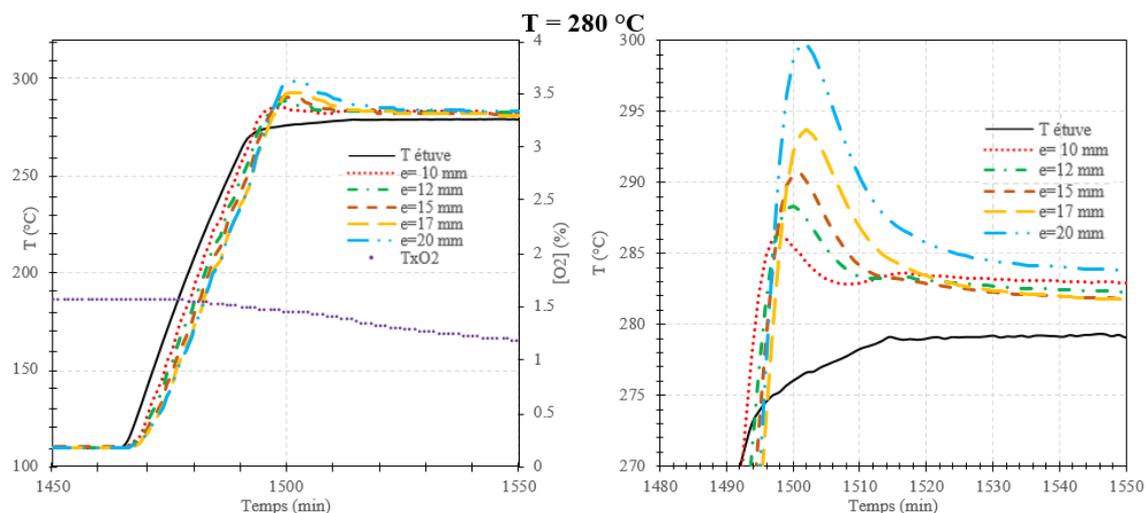


Figure 2. Effet de l'épaisseur des échantillons sur la température à cœur pour une température de torréfaction de 280°C pendant une heure (à droite sont présentés des zooms sur les pics exothermiques).

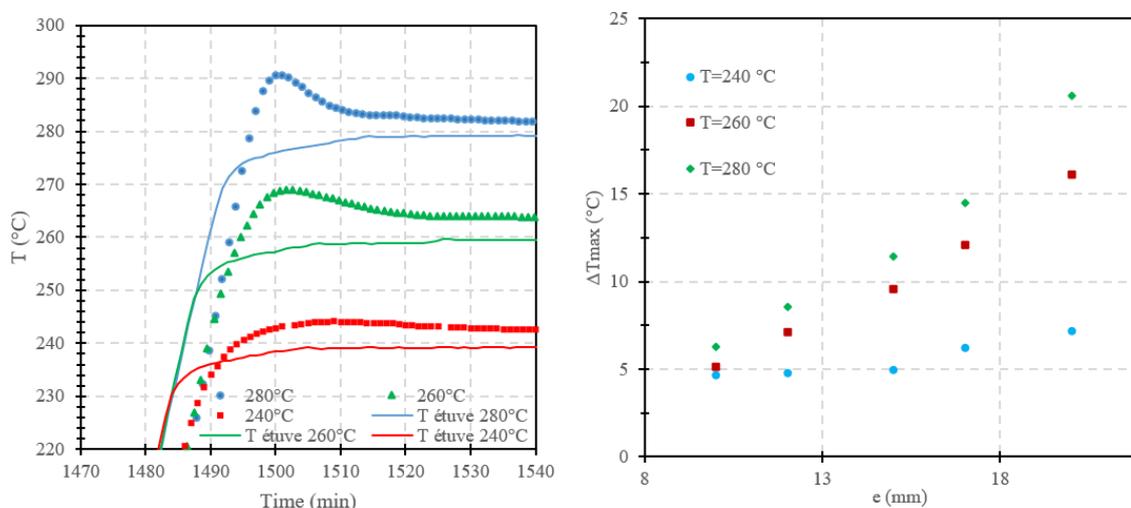


Figure 3. Comparaison des pics exothermiques pour trois intensités de traitement. À gauche, pics exothermiques pour des échantillons de 15 mm d'épaisseur ; à droite, amplitude des pics pour toutes les épaisseurs testées.

### 3.2 Perte de masse

La perte de masse globale est utilisée comme un paramètre de mesure de l'intensité de traitement thermique. La figure 4 présente l'influence de l'épaisseur des échantillons traités sur leur perte de masse. Une tendance similaire est constatée pour les trois niveaux de température étudiés : la perte de masse diminue de 10 à 12 mm puis augmente pour les plus fortes épaisseurs. De manière globale, l'augmentation des pics exothermiques liée à l'augmentation de l'épaisseur des échantillons s'accompagne d'une plus grande intensité de traitement. À partir de 12 mm d'épaisseur, l'augmentation

du temps de transfert due à l'augmentation de la longueur caractéristique de transfert de chaleur de l'étuve vers le centre de l'échantillon est compensée et dépassée par la source de chaleur produite par les réactions exothermiques. Cependant, pour la plus faible épaisseur, la conduction de chaleur de l'atmosphère vers l'échantillon prédomine aux temps courts sur les réactions exothermiques, ce qui allonge la durée de traitement des particules fines et entraîne une plus grande intensité de traitement thermique.

Une comparaison globale des trois graphes permet de confirmer un effet positif de la température sur l'intensité de traitement, la perte de masse augmentant de 12 % en moyenne à 240°C à 26 % en moyenne à 280 °C.

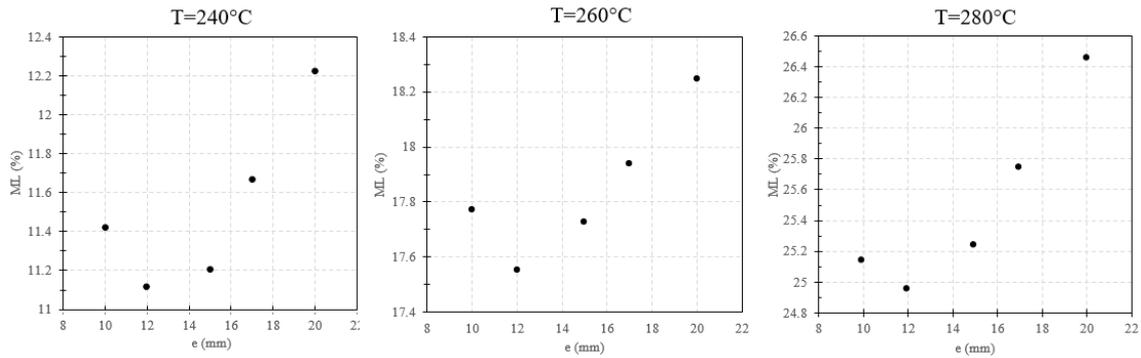


Figure 4. Effet de l'épaisseur des particules et de la température de torréfaction sur la perte de masse global des échantillons traités.

### 3.3 Composition CHNS/O

Les résultats préliminaires des analyses élémentaires montrent une augmentation du contenu en carbone ainsi qu'une diminution du contenu en hydrogène et oxygène lorsque l'intensité du traitement thermique augmente (Figure 5). Ces résultats sont tout à fait cohérents avec la littérature (Prins, Krzysztof, & Frans, 2006). L'effet de l'épaisseur sur la composition élémentaire en surface et à cœur n'est cependant pas net pour les valeurs d'épaisseur étudiées. Des études complémentaires sur des épaisseurs plus importantes sont en cours de manière à rendre compte d'une telle influence.

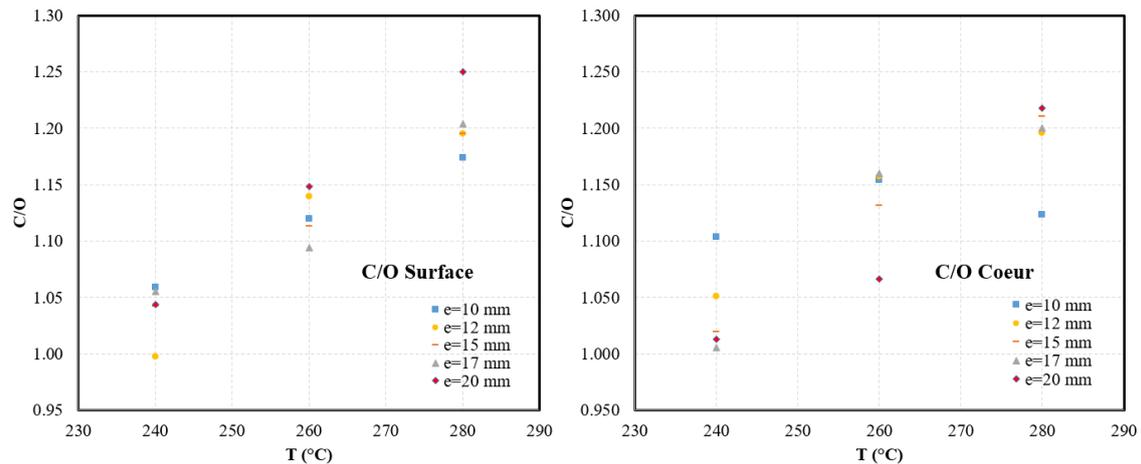


Figure 5. Ratios élémentaires de la composition en carbone et oxygène en surface et à cœur en fonction des épaisseurs des échantillons et de la température de torréfaction.

#### 4. Conclusion et perspectives

Du fait de l'influence de l'épaisseur des plaquettes de peuplier sur le transfert de chaleur à l'intérieur des échantillons, l'effet des réactions exothermiques augmente lorsque l'épaisseur des particules augmente pour des valeurs comprises entre 10 mm et 20 mm.

L'hétérogénéité et l'intensité globale du traitement thermique dépendent donc fortement de la dimension caractéristique du transfert de chaleur ainsi que de la température de torréfaction pour un temps de séjour donné. Des études en cours doivent mettre en évidence les différences entre les températures à cœur et en surface des échantillons de peuplier en fonction de l'épaisseur, ainsi que de constater des profils de composition chimique dans l'épaisseur. Ceci permettra de conclure quant à l'hétérogénéité chimique du produit solide et une taille optimale de particule pourrait alors être établie.

#### Références

- Almeida, G., Santos, D., & Perré, P., 2009. Mild pyrolysis of fast-growing wood species (Caribbean pine and Rose gum): Dimensional changes predicted by the global mass loss. *Biomass and bioenergy* 70, 407-415.
- Almeida, G., Brito, J., & Perré, P., 2008. Changes in wood-water relationship due to heat treatment assessed on micro-samples of three Eucalyptus species. *International Journal of Biology, Chemistry and Technology of Wood* 63 (1), 80-88.
- Bergman, P., Boersma, A., Zwart, R., & Kiel, J., 2005. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. *BIOCOAL, ECN ENC-C-05013*.
- Cavagnol S., Roesler J.F., Sanz E., Nastoll W., Lv P., & Perré P., 2015. Exothermicity in wood torrefaction and its impact on product mass yields: From micro to pilot scale, *Canadian J. Chemical Engineering*, **93**, 331–339.
- Chen, W., & Po-Chih, K., 2011. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy* 36, 803-811.
- Colin, J., 2007. Etude de la pyrolyse ménagée du bois : mise au point d'un four de traitement thermique, essais expérimentaux et utilisation d'un code numérique de simulation. Nancy: AgroParisTech-ENGREF.
- Crank, J., 1975. *The mathematics of diffusion*. Clarendon Press. Bristol.
- Prins, M., Krzysztow, J., & Frans, J., 2006. More efficient biomass gasification via torrefaction. *Energy* 31, 3458-2470.
- Repellin, V., Govin, A., Rolland, M., & Guyonnet, R., 2010. Energy requirement for fine grinding of torrefied wood. *Biomass and bioenergy* 34, 923-930.
- van der Stelt, M., Gerhauser, H., Kiel, J., & Ptasinski, K., 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy* 35, 3748–3762.

---

## Influence of particle thickness on the heat-treatment homogeneity of poplar wood

PACHÓN-MORALES John<sup>†</sup>, COLIN Julien<sup>a</sup>, PIERRE Florian<sup>a</sup>, PUEL François<sup>a</sup> et PERRÉ Patrick<sup>a</sup>

<sup>a</sup>LGPM, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay  
Grande Voie des Vignes, 92295 Châtenay-Malabry, France

#### Abstract

Torrefaction is a recommended pretreatment of the BtL chain. It produces a solid with characteristics between native wood and charcoal. It reduces the fibrous and resilient character of biomass and reduces

---

<sup>†</sup> Author(s) to whom the correspondence should be sent: john.pachon@centralesupelec.fr

its hygroscopicity, lowering the grinding energy and easing storage. During the torrefaction process, ensuring homogeneity of the heat treatment is fundamental in order to guarantee the desired properties of the product, in terms of energy density, chemical composition and mechanical properties. In this work, the cross effects of the thickness of poplar particles and the heat treatment intensity on the homogeneity of torrefaction are studied. For this purpose, studies of the core temperature profiles of the samples as well as the mass loss and CHNS/O elemental analysis of the samples, as function of the torrefaction intensity and the thickness were made. An increase in the magnitude of the exothermic overshoots with the treatment thickness and the heat-treatment temperature is observed. Effects of particle thickness on global mass loss of the samples are also shown. Homogeneity of the heat-treatment within the particles should therefore be result of a compromise between i) the convective heat exchanges between the particle and the reactor and ii) the heat source due to exothermic degradation reactions, prone to thermo-activation.

**Keywords:** BtL, torrefaction, temperature overshoot, elemental analysis, temperature overshoot, poplar

---