

# ÉMISSIONS DE PARTICULES FINES ISSUES DE LA COMBUSTION DOMESTIQUE DU BOIS A DIFFÉRENTS NIVEAUX D'HUMIDITÉ

K. Mahjoub\*, C. Le Dreff – Lorimier

CSTB - Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 44300 Nantes, France

\*Courriel de l'orateur : khansa.mahjoub@cstb.fr

## TITLE

**Fine particle emissions from household wood burning under varying wood moisture levels**

## RESUME

Le projet HumEmiBOIS vise à évaluer l'influence du niveau d'humidité du bois sur les émissions polluantes et le rendement de combustion d'un poêle à bois domestique. Des bûches de chêne et de hêtre, avec des niveaux d'humidité compris entre 12 % et 35 %, ont été brûlées dans des conditions de fonctionnement nominales de l'appareil. Les résultats montrent qu'une augmentation de l'humidité du combustible entraîne une hausse des concentrations particulaires, dominées par les particules submicroniques (PM<sub>0.1</sub>), ainsi qu'une diminution du rendement de combustion. Ces observations confirment l'importance du niveau d'humidité du bois dans la maîtrise des émissions issues du chauffage résidentiel.

## ABSTRACT

The objective of HumEmiBOIS project is to assess the influence of the moisture level of wood on pollutant emissions and combustion efficiency in a domestic wood stove. Oak and beech logs, with moisture levels ranging from 12% to 35%, were burned under nominal operating conditions. The results show that an increase in fuel moisture leads to a rise in particulate concentrations, mainly composed of submicronic particles (PM<sub>0.1</sub>), along with a decrease in combustion efficiency. These findings highlight the importance of wood moisture level in controlling emissions from residential wood heating.

**MOTS-CLES** : humidité du bois, combustion du bois, émissions de particules, chauffage résidentiel / **KEYWORDS**: wood moisture content, wood combustion, particulate emissions, residential heating

## 1. CONTEXTE DU PROJET HUMEMIBOIS

L'utilisation de la biomasse comme source d'énergie renouvelable pour le chauffage résidentiel au bois entraîne l'émission d'un ensemble complexe de polluants gazeux et particulaires, tels que le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et le carbone organique total (TOC) (Johansson et al., 2004). Elle génère également des particules ultrafines, classées comme probablement cancérogènes pour l'homme (groupe 2A) (Křůmal et al., 2019), en raison de la présence de composés toxiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (Ozgen et al., 2014).

Les émissions provenant de la combustion du bois résidentiel dépendent fortement de la qualité du combustible ainsi que des conditions de fonctionnement de l'appareil de chauffage (Nyström et al., 2017). Une mauvaise utilisation, par exemple un excès d'air, peut accroître les facteurs d'émission de deux à trois fois, tandis que l'emploi de petites bûches peut les augmenter jusqu'à six fois (Fachinger et al., 2017).

Parmi les caractéristiques du combustible, la teneur en humidité des bûches de bois constitue un facteur déterminant vis-à-vis des émissions polluantes. La combustion de bûches à un taux d'humidité élevé nécessite davantage d'énergie pour la vaporisation de l'eau, ce qui réduit l'efficacité et la température de combustion, favorisant ainsi la formation de produits de combustion incomplète (Van Loo et Koppejan, 2008).

Le projet de recherche HumEmiBOIS, cofinancé par l'ADEME, est conduit par le CSTB, en collaboration avec Fibois France et avec la participation de l'ULCO-CCM. Il vise à évaluer de façon quantitative l'effet du taux d'humidité du bois sur le rendement de combustion et sur les émissions polluantes, notamment les particules ultrafines. Les essais portent sur les deux essences de bois les plus utilisées en France : le chêne et le hêtre. Les émissions sont analysées pour différents taux d'humidité, variant entre 12 % et 35 %, afin d'établir des recommandations pratiques sur le taux d'humidité maximal acceptable pour un usage domestique.

## 2. MATERIEL ET METHODE

Dans cette étude, des essais de combustion ont été réalisés à l'aide d'un poêle à bois récent labellisé Flamme Verte 7★, présentant une puissance nominale de 8 kW. L'appareil était relié à un conduit d'évacuation instrumenté, permettant la mesure simultanée des émissions gazeuses (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COV<sub>totaux</sub>) et particulaires. La masse totale des particules (PM) a été déterminée par analyse gravimétrique, à partir d'un échantillonnage effectué sur un filtre en fibre de quartz placé dans un porte-filtre chauffé. La concentration en nombre de particules et la distribution granulométrique aérodynamique (comprise entre 0,006 µm et 10 µm)

ont été mesurées à l'aide d'un analyseur ELPI+ (DEKATI), installé en aval de deux diluteurs à éjecteur, le premier étant chauffé.

Chaque bûche de bois a reçu une identification unique, et des mesures précises d'humidité ont été effectuées avant la combustion en desséchant en étuve un échantillon d'environ 150 mm d'épaisseur prélevé sur la bûche. Les bûches ont ensuite été classées en cinq niveaux d'humidité : Très faible (12 % – 17 %), Faible (18 % – 20 %), Moyenne (21 % – 23 %), Élevée (24 % – 26 %), Très élevée (27 % – 35 %). L'étude comprend 35 journées d'essais, au cours desquelles quatre charges nominales ont été réalisées chaque jour, après allumage et mise en régime (de 42 minutes chacun). Les mesures ont été effectuées lors des charges de bois en conditions de fonctionnement nominal, avec deux bûches fendues de  $1,620 \text{ kg} \pm 0,05 \text{ kg}$ , sous un tirage forcé de  $-12 \text{ Pa}$ . Le critère de fin de charge correspond à l'atteinte d'une valeur de  $\text{CO}_2$  de  $6,5 \% \pm 0,5 \%$ , excepté en cas de mauvaises conditions de combustion (lorsque la valeur n'était pas atteinte ou était maintenue moins de 30 minutes) auquel cas le critère de fin de charge était l'absence de flammes.

### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

La Figure 1 présente les émissions de particules massique (PM, corrigées à 13 % d' $\text{O}_2$ ), issues de la combustion de bois de hêtre et de chêne selon différentes classes d'humidité. Pour le bois de hêtre, les classes d'humidité Très faible à Élevée présentent des niveaux similaires et relativement faibles (inférieurs à  $40 \text{ mg/Nm}^3$ ), tandis que la classe Très élevée est caractérisée par une forte augmentation des émissions (dont le niveau exact nécessiterait d'être confirmé par une seconde journée d'essais). Pour le bois de chêne, en moyenne, les émissions de particules augmentent avec l'humidité du combustible, passant d'environ  $20 \text{ mg/Nm}^3$  pour les bûches très faible en humidité à près de  $90 \text{ mg/Nm}^3$  pour les bûches à humidité très élevée. La variabilité des émissions croît également avec l'humidité pour les deux essences, comme indiqué par les barres d'erreur de plus en plus étendues.

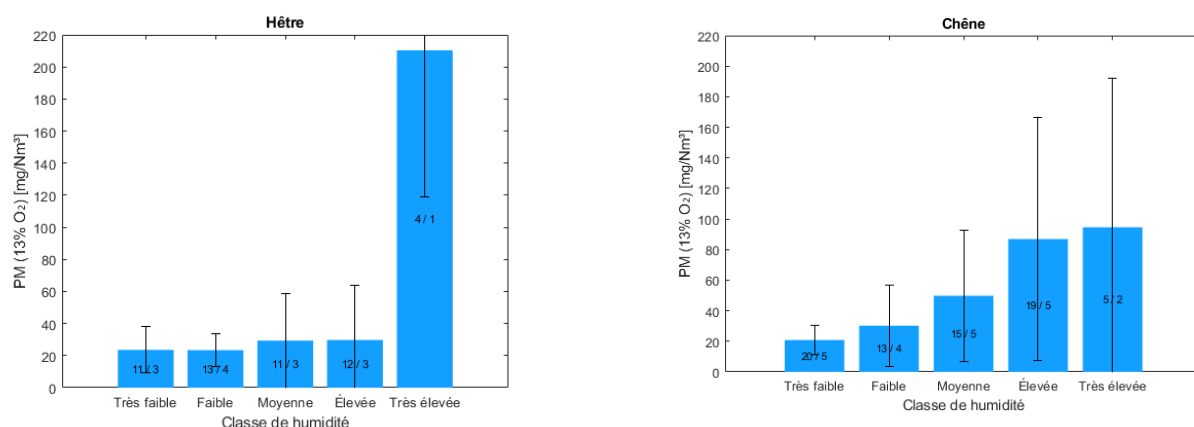


Figure 1. Concentration massique des émissions de particules pour les bois de hêtre et chêne, à différents niveaux d'humidité.

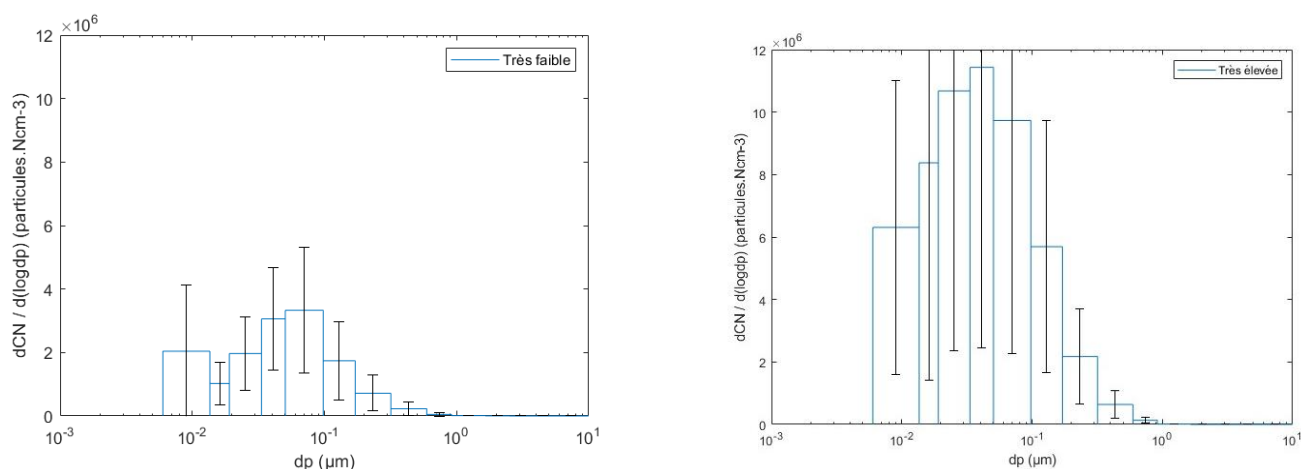


Figure 2. Distribution granulométrique des particules issues de la combustion de bois de hêtre à très faible (12–17 %) et très élevée (27–35 %) humidité.

La Figure 2 compare la distribution en nombre des particules, corrigée à 13% d'O<sub>2</sub>, émises lors de la combustion du bois de hêtre pour deux classes d'humidité extrêmes : Très faible (12–17 %) et Très élevée (27–35 %). Dans les deux cas, les particules submicroniques (et même ultrafines) dominent les émissions, avec un mode situé autour de 0,06 µm pour le bois à humidité très faible et autour de 0,04 µm pour le bois à humidité très élevée. La concentration en nombre croît avec l'humidité du combustible, avec un facteur d'augmentation d'environ quatre entre les deux niveaux considérés.

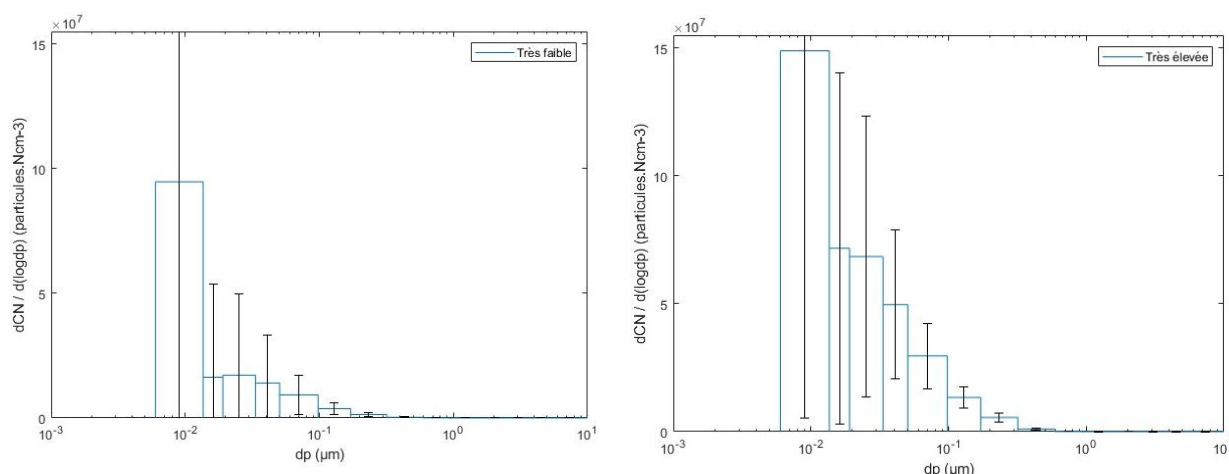


Figure 3. Distribution granulométrique des particules issues de la combustion de bois de chêne à très faible (12–17 %) et très élevée (27–35 %) humidité.

La Figure 3 illustre la distribution en nombre des particules émises lors de la combustion du bois de chêne. Comparativement au hêtre (Figure 2), les concentrations en particules sont nettement plus élevées, comme l'indique une échelle verticale environ dix fois supérieure. Pour le chêne à humidité très faible, la distribution présente un mode prononcé autour de 0,01 µm, dominant nettement le reste de la distribution. En revanche, pour le chêne à humidité très élevée, le rapport entre la concentration du mode à 0,01 µm et le reste de la distribution diminue, traduisant la formation d'un nombre plus important de particules de tailles comprises entre 0,01 µm et 0,1 µm. Ainsi, les résultats indiquent également une différence entre les distributions granulométriques des deux essences : la combustion du chêne produit une proportion majoritaire de particules ultrafines de plus petite taille que celles observées pour le hêtre.

L'évolution de la concentration des émissions particulaires est cohérente avec les observations rapportées dans la littérature. Magnone et al. (Magnone et al., 2016) ont mis en évidence une augmentation d'un facteur 4,5 des émissions totales de carbone lorsque l'humidité du bois passait de 10,3 % à 56,3 %. De même, Kinsey et al. (Kinsey et al., 2009) et Hays et al. (Hays et al., 2003) ont observé que la combustion de chêne à 28–30 % d'humidité généraient des émissions significativement plus élevées que celles obtenues avec du bois sec (≈11–12 %). Les travaux de Lai et al. (Lai et al., 2024), réalisés sur un équipement de laboratoire dédié, confirment cette évolution, en attribuant la hausse des émissions à une réduction de la température de flamme et à une combustion incomplète des composés volatils dans le cas des bois humides.

#### 4. CONCLUSION

Les résultats du projet HumEmiBOIS mettent en évidence l'effet du taux d'humidité du bois sur les émissions polluantes et les performances du chauffage résidentiel. L'augmentation de l'humidité du combustible conduit à une diminution du rendement et à une élévation des concentrations particulaires, dominées par les particules submicroniques (PM<sub>0.1</sub>). Ces tendances ont été observées pour les deux essences étudiées, chêne et hêtre, sur une plage d'humidité comprise entre 12 % et 35 %. Elles sont cohérentes avec les résultats rapportés dans la littérature, qui associent des teneurs en eau élevées à une baisse de la température de flamme et à une combustion incomplète des composés volatils. Les résultats obtenus soulignent également le rôle de l'humidité du combustible dans la variabilité des émissions issues de la combustion du bois en conditions domestiques.

Les auteurs remercient l'ADEME (Agence de la transition écologique) pour son soutien financier apporté au projet HumEmiBOIS dans le cadre du programme AQACIA.

## 5. RÉFÉRENCES

- Fachinger, F., Drewnick, F., Gieré, R., Borrmann, S., 2017. How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet stoves: Emission factors for different fuels and burning conditions. *Atmos. Environ.* 158, 216–226. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.027>
- Hays, M.D., Smith, N.D., Kinsey, J., Dong, Y., Kariher, P., 2003. Polycyclic aromatic hydrocarbon size distributions in aerosols from appliances of residential wood combustion as determined by direct thermal desorption—GC/MS. *J. Aerosol Sci.* 34, 1061–1084. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(03\)00080-6](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(03)00080-6)
- Johansson, L.S., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C., Potter, A., 2004. Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmos. Environ.* 38, 4183–4195. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.04.020>
- Kinsey, J.S., Kariher, P.H., Dong, Y., 2009. Evaluation of methods for the physical characterization of the fine particle emissions from two residential wood combustion appliances. *Atmos. Environ.* 43, 4959–4967. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.008>
- Křůmal, K., Mikuška, P., Horák, J., Hopan, F., Krpec, K., 2019. Comparison of emissions of gaseous and particulate pollutants from the combustion of biomass and coal in modern and old-type boilers used for residential heating in the Czech Republic, Central Europe. *Chemosphere* 229, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.137>
- Lai, Y., Liu, X., Davies, M., Fisk, C., Holliday, M., King, D., Zhang, Y., Willmott, J., 2024. Characterisation of wood combustion and emission under varying moisture contents using multiple imaging techniques. *Fuel* 373, 132397. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132397>
- Magnone, E., Park, S.-K., Park, J.H., 2016. Effects of Moisture Contents in the Common Oak on Carbonaceous Aerosols Generated from Combustion Processes in an Indoor Wood Stove. *Combust. Sci. Technol.* 188, 982–996. <https://doi.org/10.1080/00102202.2015.1136300>
- Nyström, R., Lindgren, R., Avagyan, R., Westerholm, R., Lundstedt, S., Boman, C., 2017. Influence of Wood Species and Burning Conditions on Particle Emission Characteristics in a Residential Wood Stove. *Energy Fuels* 31, 5514–5524. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02751>
- Ozgen, S., Caserini, S., Galante, S., Giugliano, M., Angelino, E., Marongiu, A., Hugony, F., Migliavacca, G., Morreale, C., 2014. Emission factors from small scale appliances burning wood and pellets. *Atmos. Environ.* 94, 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.032>
- Van Loo S., Koppejan J., *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, Earthscan, 2008