

EFFET DE LA TENEUR EN EAU DU COMBUSTIBLE SUR LES ÉMISSIONS DE FUMÉE LORS DE LA COMBUSTION D'UNE HAIE DE CISTE

B. Martinent^{*1}, C. Luciani¹, P.A. Santoni¹, V. Tihay-Felicelli¹ et T. Barboni¹

¹UMR SPE 6134, Université de Corse, 20250 Corte, France

*Courriel de l'orateur : Martinent_b@univ-corse.fr

RESUME

L'objectif de ce travail était d'analyser les émissions provenant de la combustion d'un arbuste *Cistus monspeliensis* exposé à un feu de faible intensité, se propageant sur un lit de combustible. La teneur en eau des feuilles du ciste variait entre 10 et 100 %. L'inflammation des arbustes a été réalisée à l'aide d'un feu de faible intensité se propageant sur un lit combustible constitué de laine de bois. Les essais au feu ont été réalisés à l'aide d'un calorimètre à grande échelle afin de collecter les gaz et d'analyser la dynamique de combustion. Les émissions de gaz et la distribution des aérosols ont été mesurées respectivement à l'aide d'un FTIR et d'un ELPI+. Plus la teneur en eau est élevée, plus il y a de gaz non brûlés et d'aérosols (suie et goudrons) présents. Le diamètre aérodynamique moyen des aérosols s'est avéré être de 41 nm pour une combustion quasi stable. Pendant la propagation de la flamme à l'ensemble de l'arbuste, des particules fines (9-70 nm) et grossières (2-10 µm) ont été observés. Les facteurs d'émission ont été calculés pour les gaz et les aérosols.

ABSTRACT

The aim of this work was to analyse emissions from a burning *Cistus monspeliensis* shrub exposed to a fire front spreading across a fuel bed. The leaf moisture content of cistus was ranging from 10 to 100%. The ignition of the shrubs was performed with a low intensity fire spreading across a fuel bed made of wood wool. The fire tests were conducted under a Large-Scale Heat Release Calorimeter in order to collect gases and analyse the combustion dynamics. Gas emission and aerosols distribution were measured respectively with a FTIR and an ELPI+. The higher the LMC the more unburned gases and aerosols (soot and tars) are present. Mean aerosol aerodynamic diameter was found to be 41 nm for quasi-steady combustion. During flame spreading to the entire shrub, small (9-70 nm) and coarse (2-10 µm) aerosols were observed. Emission factors were calculated for both gases and aerosols.

MOTS-CLÉS : aérosols, combusiton de biomasse, facteurs d'émission, teneur en eau, distribution de particule, émission des fumées / **KEYWORDS:** aerosols, biomass combustion, emission factors, fuel moisture content, particle size distribution, smoke emissions

1. INTRODUCTION

Les incendies de forêt constituent un problème environnemental majeur qui a des répercussions sur les écosystèmes, la qualité de l'air et la santé humaine (Dokas et al., 2007). Il est essentiel de comprendre la dynamique complexe de la combustion de la végétation et les émissions qui y sont associées pour gérer efficacement les incendies de forêt, mettre en place des stratégies d'atténuation et évaluer leurs effets sur la santé humaine. L'influence de la teneur en eau du combustible sur la production de gaz a déjà été étudiée (Tihay-Felicelli et al., 2017), mais les analyses des aérosols sont rares. L'impact de la fumée sur la population n'est pas encore entièrement compris, en particulier compte tenu du grand nombre de produits libérés lors de la combustion. La fumée est composée d'un mélange complexe de gaz, de composés volatils et d'aérosols, notamment des goudrons, de la suie et des cendres volantes (Ouf, 2006; Vassilev et al., 2013), qui interagissent entre eux, ce qui les rend encore plus complexes. Ensuite, en fonction de l'exposition, de la morphologie et de la nature de la personne, les aérosols pénétreront plus ou moins nos mécanismes de défense. La taille des particules est une caractéristique essentielle, car notre système respiratoire nous protège contre les grosses particules (PM_{10} et $PM_{2,5}$), mais les petites particules (PM_1) atteignent les alvéoles et les plus petites ($PM_{0,1}$) peuvent même traverser la barrière épithéliale, ce qui leur permet d'entrer dans la circulation systémique et d'atteindre les organes (Li et al., 2019; Miller et al., 2017; Nemmar et al., 2013; Saleh, 2020). Il est donc crucial de caractériser la distribution granulométrique, la morphologie et le type des aérosols émis lors des incendies de forêt. L'objectif de cette recherche est d'analyser l'effet de la teneur en eau des feuilles (LMC) sur l'émission de gaz et d'aérosols lors de la combustion de végétaux afin d'approfondir nos connaissances. Des arbustes de *Cistus monspeliensis* ont été utilisés comme support pour cette étude.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Description et conditionnement du combustible

Les essais au feu ont consisté à enflammer des arbustes de *Cistus monspeliensis* avec un feu de faible intensité se propageant sur un lit combustible constitué de laine de bois. De la laine de bois de pin blanc a été utilisée pour imiter une inflammation provenant d'une couche herbacée brûlant en dessous. La laine de bois a été séchée au four à 60 °C pendant 24 heures. Les arbustes de ciste ont été prélevés dans la nature, puis séchés en laboratoire afin d'obtenir différentes teneurs en eau apparente (LMC) comprises entre 10 et 100 %. La teneur en eau a été déterminée à l'aide d'un dessiccateur. Les résultats de l'analyse finale (NF EN 16948) et de la teneur en cendres obtenue par calcination à 815 °C (norme ISO 1171) du ciste et de la laine de bois sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Analyse élémentaire de la frisure de bois et du *Cistus Monspeliensis*

Fuel	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	Ash (%)
Wood wool	51.4	6.21	0.24	41.7	0.5
<i>Cistus monspeliensis</i>	50.6	5.9	0.75	38.7	0.7

2.2. Méthode expérimentale

Au total, 63 essais au feu ont été réalisés. Pour chaque expérience (fig. 1), un arbuste reconstitué de *Cistus monspeliensis* a été placé à l'intérieur d'une cage en treillis soudé de $0,5 \times 0,5 \times 1 \text{ m}^3$ et face à un lit de laine de bois de $0,7 \times 0,6 \times 0,1 \text{ m}^3$. Le ciste et le lit de combustible ont été installés sur un banc de combustion ($0,2 \text{ m}$ du lit de combustible était situé sous les branches du ciste) posé sur une cellule de charge et placé sous le capot d'un calorimètre à grande échelle (LSHR) de 1 MW. La technique de calorimétrie par consommation d'oxygène a été utilisée pour évaluer l'énergie libérée pendant la combustion. Pour chaque essai, la masse humide initiale de l'arbuste (m_{humide}) a été modifiée afin de maintenir une masse sèche constante des feuilles d'environ $0,332 (\pm 0,005) \text{ kg}$. Afin de représenter la forme et la densité apparente réelles de l'arbuste (Morandini et al., 2019). En fonction de la valeur LMC, entre 2,23 et 3,84 kg de branches de ciste humides ont été placées dans la cage. 250 g de laine de bois sèche ont été répartis uniformément sur le banc de combustion afin d'obtenir une charge de combustible de $0,6 \text{ kg/m}^2$. L'allumage du lit a été effectué avec 3 ml d'éthanol répartis sur toute la largeur du bord du lit. Des expériences spécifiques ont été menées pour brûler uniquement de la laine de bois afin d'analyser ses émissions de fumée. Une caméra GoPro a été placée sur le côté du dispositif afin de filmer les différentes phases de la combustion.

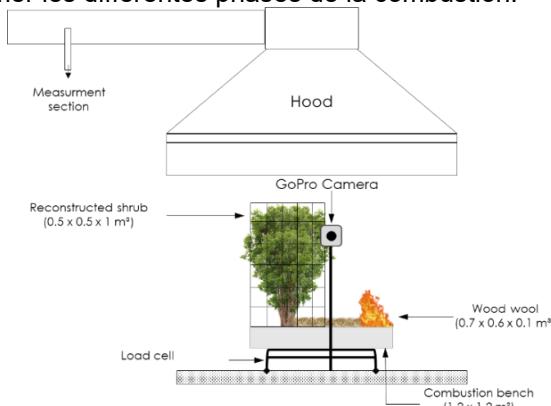


Figure 1. Setup experimental pour la combustion d'une haie

La fumée a été analysée à l'aide d'appareils de mesure en ligne connectés au tuyau d'échappement (voir fig. 1). Un analyseur ELPI+ (Electrical Low-Pressure Impactor +) a été utilisé pour étudier les aérosols. L'ELPI+ comporte 14 étages allant de 6 nm à 10 µm de diamètre aérodynamique. Un eDiluter™ Pro a été installé entre la ligne d'échantillonnage et l'ELPI+ afin d'effectuer une double dilution du flux d'air échantillonné, d'abord à chaud puis à froid. Cela a permis de fixer les aérosols et d'éviter toute condensation éventuelle, tout en veillant à ne pas dépasser les seuils de détection maximaux de l'ELPI+. Une dilution totale de 25 a été appliquée pendant toutes les expériences. Les aérosols contenus dans le flux d'air échantillonné ont ensuite été séparés à l'aide de plaques de collecte frittées. Cela a permis d'obtenir en temps réel la concentration et la distribution des particules en suspension dans l'air. La masse des aérosols et les facteurs d'émission ont ensuite été calculés.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Production de particules

Les aérosols produits par la combustion de la biomasse sont variés, notamment la suie, les goudrons, les cendres volantes et les cendres volantes grossières, chacun apparaissant à des stades distincts pendant la combustion des arbustes (Ouf, 2006; Vassilev et al., 2013). Pour évaluer la production d'aérosols pendant la combustion des arbustes de ciste, nous avons utilisé les données ELPI+, qui seront présentées sous deux formats complémentaires : la distribution granulométrique en nombre et la distribution granulométrique en volume. La distribution du nombre de particules se concentre sur le nombre de particules pour chaque classe de taille d'aérosol, indiquant si l'échantillon est principalement composé de petites ou de grandes particules. La distribution en volume, quant à elle, tient compte du volume occupé par les particules dans chaque classe de taille, donnant une indication de la masse totale des particules et mettant ainsi davantage l'accent sur les particules les plus grosses que la distribution en nombre.

Un exemple de distribution granulométrique est présenté à la figure 3 en fonction du diamètre aérodynamique et du temps pour un ciste en combustion avec un LMC de 25 %. La figure 3 (b) montre clairement que la distribution numérique est centrée sur un diamètre de 41 nm. Dans la figure 3 (a), la ligne noire représente le

temps d'inflammation de l'arbuste. Au moment de l'inflammation et pendant la propagation verticale du feu dans l'arbuste, nous observons des particules dont le diamètre aérodynamique très fin varie entre 9 et 70 nm (figure 3 (a), spot 1). Cette observation peut s'expliquer comme suit : pendant ces phases d'inflammation et de propagation du feu, la combustion émet une grande quantité de vapeur d'eau. Cette vapeur dilue les gaz de pyrolyse produits, réduisant la croissance en surface et l'agglomération des particules, et émettant ainsi des aérosols de petits diamètres aérodynamiques (Drysdale, 2011). Au pic du HRR qui se produit à 60 secondes, on observe un pic de production d'aérosols (fig. 3 (a)). Ce pic se produit pour un diamètre aérodynamique de 41 nm. Enfin, à mesure que le HRR diminue et que la quasi-totalité de l'eau est libérée, la surface de croissance des particules augmente en raison de leur agglomération. Cette tendance se traduit par une augmentation du diamètre aérodynamique, qui varie de 25 à 234 nm (Fig. 3 (a), spot 2).

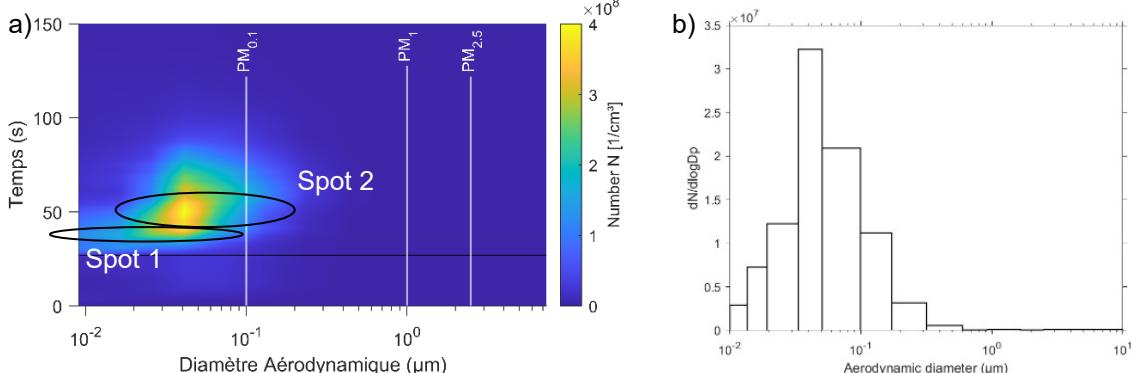


Figure 2. Distribution des tailles de particules en nombre ($dN/\log Dp$) pour un essai d'incendie avec une teneur en eau des feuilles de 25 % (a) en fonction du temps et du diamètre aérodynamique, (b) pour l'ensemble de l'expérience de combustion.

La figure 4 présente, pour la même expérience, la distribution granulométrique en volume en fonction du diamètre aérodynamique et du temps. Nous avons vu précédemment que la distribution numérique était centrée sur 41 nm (figure 3 (b)). Cependant, l'analyse de la distribution massique donne une vision différente. Nous pouvons observer la forte contribution numérique des particules dont le diamètre varie entre 2 et 10 μm (fig. 4 (b)) et que les particules fines sont à peine perceptibles par rapport aux plus grosses. Lorsque le ciste s'enflamme, les grosses particules sont majoritaires en termes de volume (fig. 4 (a), Spot 1). Cela est dû à l'émission simultanée de goudrons et de cendres, qui représentent 52 % du volume des aérosols. Au fur et à mesure que le ciste subit la combustion et la propagation verticale du feu (Fig. 4 (a), 2), des particules de 41 à 742 nm ont été émises, ce qui correspond à la formation de suie dans la flamme.

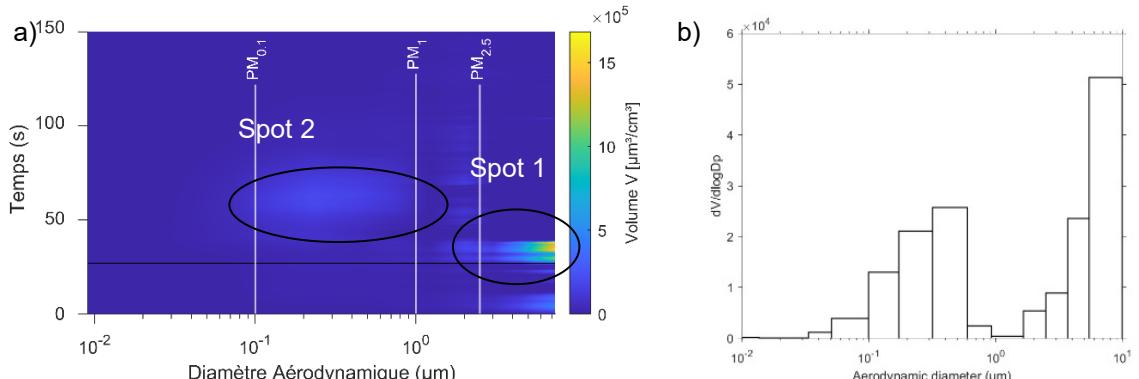


Figure 3. Distribution des particules en volume ($dV/\log Dp$) pour un essai d'incendie avec une teneur en eau des feuilles de 25 % (a) en fonction du temps et du diamètre aérodynamique, (b) pour l'ensemble de l'expérience de combustion.

Les aérosols produits lors de la combustion de la laine de bois ont été soustraits de la masse totale des aérosols. L'EF moyen des aérosols augmente de 7,4 à 65 g/kg de combustible sec à mesure que le LMC passe de 10 à 85 %.

Pour faciliter l'interprétation, les aérosols ont été regroupés en quatre classes de taille : PM_{0,1}, PM_{0,1-1}, PM_{1-2,5} et PM_{2,5-10}, correspondant respectivement aux étapes 1-5, 6-9, 10-11 et 12-14 de l'ELPI+. Cette classification résume les tendances observées au cours des 14 étapes et met en évidence les mécanismes de formation dominants en fonction de la taille des particules.

La combustion d'arbustes très humides (LMC = 85 %) était instable et non représentative des conditions de combustion typiques. La concentration en nombre de particules ultrafines (PM_{0,1}) a montré une grande variabilité sans tendance claire, tandis que la classe PM_{0,1-1} a augmenté progressivement avec la LMC, reflétant des processus de condensation-agglomération renforcés et une oxydation incomplète de la suie dans

des conditions humides. Cette tendance peut s'expliquer par une augmentation des composés non brûlés et une oxydation moins efficace de la suie à la sortie de la flamme, conduisant à des particules enrichies en matière condensée ou à des structures moins fragmentées. En volume, la fraction PM_{0,1-1} représentait près de la moitié du total ($\approx 45\%$), tandis que les particules grossières (PM_{2,5-10}) devenaient plus importantes à des valeurs LMC intermédiaires et élevées. À des teneurs en eau élevées, la réduction du rendement de combustion favorise la formation de charbon (Babrauskas, 2006), ce qui augmente les émissions et l'entraînement de particules grossières (PM_{2,5-10}), y compris les particules partiellement brûlées (PBP) et les cendres volantes grossières (CFA) (Martinent et al., 2025). Ce mécanisme explique la contribution plus importante des fractions grossières observée dans des conditions humides. Dans l'ensemble, le volume total d'aérosols a augmenté avec la teneur en eau des feuilles, indiquant un changement dans les mécanismes de formation des particules vers une production plus importante de fractions condensées et grossières dans des conditions plus humides.

4. CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'influence de la teneur en eau du combustible (LMC) sur les émissions de gaz et d'aérosols lors de la combustion d'arbustes *Cistus monspeliensis*.

Deux seuils critiques de teneur en eau des feuilles ont été identifiés pour l'inflammation ($\approx 85\%$) et la propagation du feu ($\approx 55\%$) dans la couronne de l'arbuste.

En ce qui concerne les aérosols, les résultats démontrent que la teneur en eau modifie considérablement la quantité et les caractéristiques des particules émises. Alors que les particules ultrafines (PM_{0,1}) ont montré une grande variabilité, la fraction PM_{0,1-1} a augmenté régulièrement avec la LMC, reflétant des processus de condensation-agglomération renforcés et une oxydation moins efficace de la suie. Ce comportement suggère la formation de particules enrichies en matière condensée ou de structures de suie moins fragmentées. Une teneur élevée en eau favorise la formation de fractions d'aérosols condensés et grossiers en raison d'une combustion plus lente et d'une formation accrue de charbon.

Dans l'ensemble, le volume total d'aérosols a augmenté avec la teneur en eau du combustible, indiquant un changement dans les mécanismes dominants de formation des particules vers des fractions plus condensées et plus grossières dans des conditions plus humides. Ces résultats soulignent le rôle essentiel de l'eau du combustible dans la formation des émissions de gaz et d'aérosols lors de la combustion de la végétation, et ils fournissent de nouvelles informations pour comprendre les propriétés de la fumée et les impacts sur la qualité de l'air des incendies de forêt dans les écosystèmes méditerranéens.

- Babrauskas, V., 2006. Effective heat of combustion for flaming combustion of conifers. *Can. J. For. Res.* 36, 659–663. <https://doi.org/10.1139/x05-253>
- Dokas, I., Statheropoulos, M., Karma, S., 2007. Integration of field chemical data in initial risk assessment of forest fire smoke. *Science of The Total Environment* 376, 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.064>
- Drysdale, D., 2011. An Introduction to Fire Dynamics, 3rd Edition | Wiley, Wiley. ed.
- Li, D., Li, Y., Li, G., Zhang, Y., Li, J., Chen, H., 2019. Fluorescent reconstitution on deposition of PM2.5 in lung and extrapulmonary organs. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, 2488–2493. <https://doi.org/10.1073/pnas.1818134116>
- Martinent, B., Santoni, P.-A., Coppalle, A., Quilichini, Y., Barboni, T., 2025. Investigation of the morphology and composition of aerosols from plant burning. *Journal of Aerosol Science* 106589. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2025.106589>
- Miller, M.R., Raftis, J.B., Langrish, J.P., McLean, S.G., Samutrtai, P., Connell, S.P., Wilson, S., Vesey, A.T., Fokkens, P.H.B., Boere, A.J.F., Krystek, P., Campbell, C.J., Hadoke, P.W.F., Donaldson, K., Cassee, F.R., Newby, D.E., Duffin, R., Mills, N.L., 2017. Inhaled Nanoparticles Accumulate at Sites of Vascular Disease. *ACS Nano* 11, 4542–4552. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b08551>
- Morandini, F., Santoni, P.A., Tramoni, J.B., Mell, W.E., 2019. Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rockrose under severe drought conditions. *Fire Safety Journal* 108, 102836. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102836>
- Nemmar, A., Holme, J.A., Rosas, I., Schwarze, P.E., Alfaro-Moreno, E., 2013. Recent Advances in Particulate Matter and Nanoparticle Toxicology: A Review of the In Vivo and In Vitro Studies. *BioMed Research International* 2013, 279371. <https://doi.org/10.1155/2013/279371>
- Ouf, F.-X., 2006. Caractérisation des aérosols émis lors d'un incendie. Université de Rouen.
- Saleh, Y., 2020. Etude de la pathogénicité pulmonaire des polluants atmosphériques nanoparticulaires. Université de Lille.
- Santoni, P.-A., Romagnoli, E., Chiaramonti, N., Barboni, T., 2015. Scale effects on the heat release rate, smoke production rate, and species yields for a vegetation bed. *Journal of Fire Sciences* 33, 290–319.
- Tihay-Felicelli, V., Santoni, P.A., Gerandi, G., Barboni, T., 2017. Smoke emissions due to burning of green waste in the Mediterranean area: Influence of fuel moisture content and fuel mass. *Atmospheric Environment* 159, 92–106. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.04.002>
- Vassilev, S.V., Baxter, D., Vassileva, C.G., 2013. An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter. *Fuel* 112, 391–449. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.043>