PRODUCTION DE SUIES LORS D'UN INCENDIE : EFFET DE LA CONCENTRATION EN DIOXYGENE DU GAZ COMBURANT

F-X. Ouf[1*], L. Lintis[1], C. Vallières[2]

[1]Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSN-RES, SCA, Gif-sur-Yvette, 91192, France
[2]Laboratoire Réaction et Génie des Procédés (LRGP), UMR 7274, CNRS-Université de Lorraine, F-54000, Nancy, France.

*francois-xavier.ouf@irsn.fr

TITLE

Soot production during fire: influence of dioxygen concentration of oxidizing gas

RESUME

La caractérisation des suies produites lors d'un incendie s'avère indispensable afin de décrire leur comportement physico-chimique et les conséquences induites par leur transport et leur dépôt. Ce travail présente les développements expérimentaux réalisés sur l'influence de la sous-oxygénation du gaz comburant, induite par le confinement de nombreuses installations industrielles, sur les propriétés physico-chimiques de suies. Des premiers éléments d'interprétation sont de plus introduits.

ABSTRACT

Characterization of soot produced during a fire is essential in order to describe their physicochemical behavior and the consequences induced by their transport and deposit. This work presents the experimental developments carried out on the influence of the under-oxygenation of the oxidizing gas, induced by the confinement of numerous industrial facilities, on the physicochemical properties of soot. First elements of interpretation are also introduced.

MOTS-CLÉS: suies, incendies, effet d'échelle, sous-oxygénation / **KEYWORDS:** soot, fire, scale effect, low oxygen condition

1. INTRODUCTION

Parmi les accidents susceptibles de se produire dans une installation nucléaire de base (INB), l'incendie représente un risque majeur. Il peut endommager des éléments essentiels à la sûreté et conduire à la dispersion de matières radioactives dans l'installation, voire dans l'environnement. L'IRSN réalise des travaux de recherche afin de développer des modèles permettant de prédire les quantités ainsi que les propriétés physico-chimiques des aérosols émis lors d'incendie. Les caractéristiques de ces particules ont été grandement étudiées à échelle du laboratoire (Ouf, 2016). Les connaissances acquises sur les propriétés spécifiques des suies (morphologie, composition, taille, propriétés thermiques, électriques) sont progressivement prises en considération afin de décrire les conséquences induites par leur dépôt telles que le dysfonctionnement d'équipements électriques/électroniques remplissant une fonction de sûreté (Piller & Coutin, 2017), le colmatage des filtres à très haute efficacité (Bourrous et al., 2016; Lintis et al., 2021) équipant les réseaux de ventilation des installations nucléaires de base (INB) ou plus récemment afin de quantifier ce dépôt dans les locaux en feu (Kort et al., 2020). A ce jour, une grande partie de ces travaux repose sur des études expérimentales menées à échelle analytique (foyers de diamètres inférieurs à 1 m) et pour des conditions de ventilation naturelle du foyer. Afin d'exploiter au mieux les connaissances acquises à cette échelle analytique, il s'avère dorénavant nécessaire de développer des outils permettant de transposer ces connaissances, ainsi que les modèles associés, à une échelle et des concentrations en oxygène représentatives d'un incendie dans une INB. Cette communication présente les résultats expérimentaux obtenus par l'IRSN afin de décrire, dans un premier temps, les conséquences, sur le plan de la production de suies (facteur d'émission, granulométrie, morphologie, composition), de la sous-oxygénation induite par les spécificités d'un foyer incendie pouvant se dérouler dans des installations industrielles confinées.

2. MATERIEL ET METHODES

Afin de produire des suies pour des conditions représentatives d'une atmosphère viciée en dioxygène, l'installation PARIS (Production d'Aérosols Représentatifs d'Incendie Sous-oxygéné, figure 1) a été mise en place (Lintis et al., 2021). Elle est composée d'une chambre de combustion dans laquelle est placé le combustible et au sein de laquelle la composition du gaz comburant injecté est imposée en réalisant un mélange d'air et d'azote. L'atmosphère environnant le combustible est alors maîtrisée en termes de teneur

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2021-24808 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

en dioxygène [O_2] et permet de reproduire les conditions d'une atmosphère viciée. La chambre de combustion est surmontée d'une colonne de transport des aérosols. Ces deux éléments sont calorifugés et la colonne est maintenue à une température de 150°C afin de réduire les dépôts de suies par thermophorèse. Un prélèvement et une dilution sont réalisés à l'aide d'un système de dilution FPS 4000 (DEKATI). Les échantillons sont ensuite caractérisés en termes de granulométrie à l'aide d'un SMPS (3080 TSI), de concentration massique et de teneur en oxygène par prélèvements sur substrats puis pesées et analyses élémentaires (CHONS ou XPS), en termes de morphologie par prélèvement et analyse sur grille de microscopie électronique en transmission (MET) et en termes de concentration surfacique déposée à l'aide d'un compteur NSAM (3550 TSI). On notera par ailleurs que cette méthodologie de caractérisation a été menée sur une seconde installation, dénommé CADUCEE (figure 1), et a permis de réaliser des essais similaires en conditions sous-oxygénées pour des foyers de plus grandes dimensions (Alibert et al., 2017).
Trois combustibles liquides (Heptane, Huile hydraulique DTE Medium et mélange de solvants utilisés dans le procédé de retraitement du combustible nucléaire TriButyl Phosphate – Tétrapropylène hydrogéné TBP/TPH) et un polymère (PolyMethyl MethAcrylate PMMA, composant majoritaire des boîtes à gants utilisées dans l'industrie nucléaire) ont été considérés. Ces combustibles ont été étudiés à échelle analytique (foyers liquides de moins 6 cm de diamètre et solides de moins de 25 cm² pour PARIS, ces foyers étant de 20 cm de diamètre et 40x40 cm² pour CADUCEE) et pour des concentrations en dioxygène comprises, selon le combustible, entre 15 et 21 %. Afin de discuter les tendances observées entre les combustibles, les résultats seront présentés sous forme adimensionnée, en divisant chacune des grandeurs d'intérêt par la valeur équivalente mesurée pour une concentration [O_2] de 21 %.

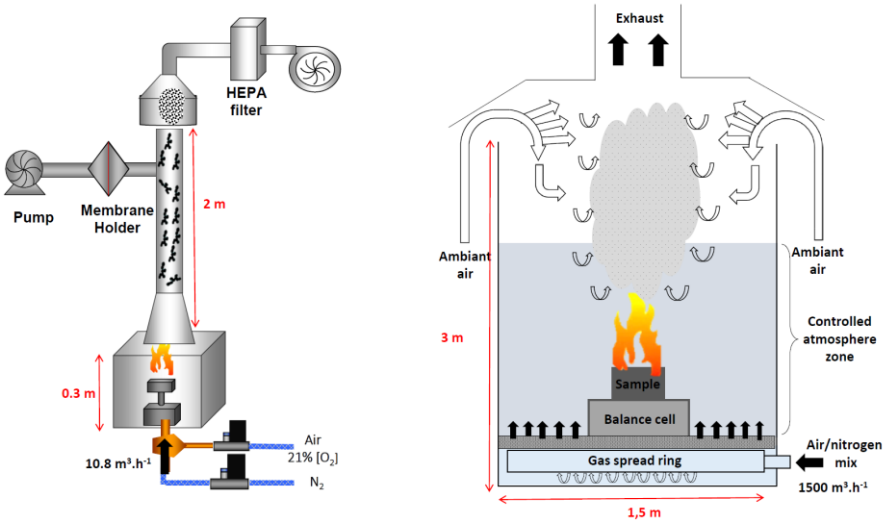

Figure 1 : schéma de principe des installations de production de suies en milieu sous-oxygéné, PARIS à gauche et CADUCEE à droite

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1. Effet de la sous-oxygénation sur le facteur d'émission des suies

La figure 2 présente l'évolution du facteur d'émission adimensionné des suies (masse de suies produites divisée par la masse de combustible consommé) en fonction de la concentration en dioxygène. Une diminution notable de ce facteur d'émission adimensionné est observée lorsque la concentration en dioxygène diminue, quels que soient le combustible et l'échelle (PARIS ou CADUCEE). Cette diminution apparaît relativement contre-intuitive mais s'avère en accord avec les travaux de la littérature (Peatross & Beyler, 1997) qui soulignent une diminution du débit massique de combustion lorsque la concentration en dioxygène diminue. On notera de plus que l'observation visuelle des flammes souligne, là aussi de manière contre-intuitive, une coloration de plus en plus « bleutée » lorsque la concentration en dioxygène diminue, mettant en évidence une production moindre de suies et des conditions de plus en plus stœchiométriques (en désaccord avec la notion de sous-oxygénation de la flamme). Cette coloration bleue supporte de plus l'hypothèse de conditions de températures propices à l'oxydation des suies dans la flamme et donc à une plus faible production de suies. Qui plus est, cette hypothèse est supportée par l'analyse de la teneur en oxygène des suies, grandeur augmentant lorsque la concentration en dioxygène du gaz comburant diminue (cf. figure 2).

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2021-24808 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

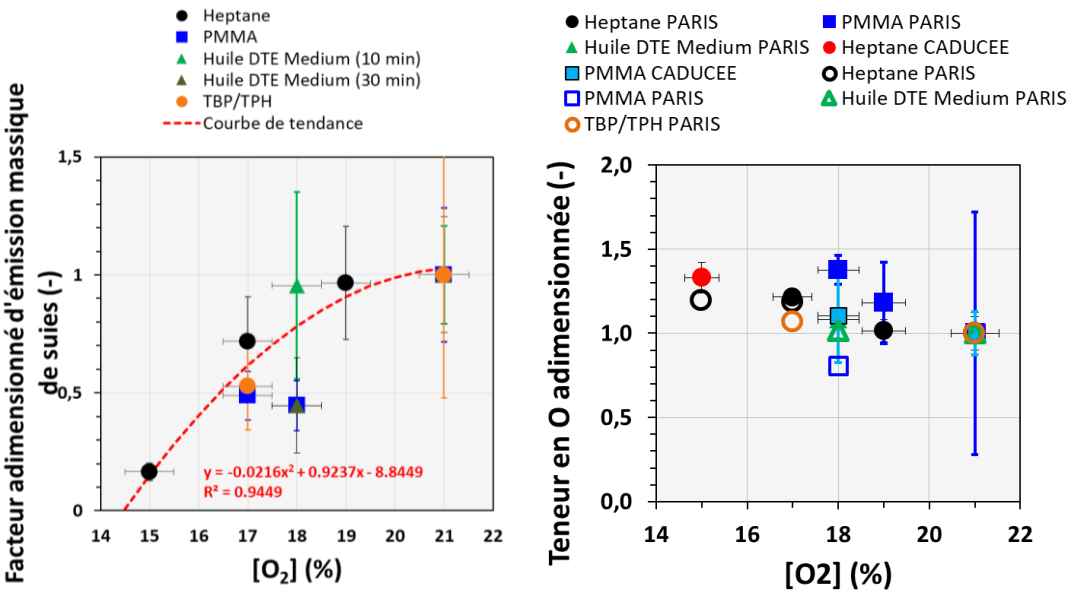

Figure 2 : évolution du facteur d'émission et de la teneur en oxygène des suies en fonction de la concentration en dioxygène

3.2. Effet de la sous-oxygénation sur la granulométrie des suies

La figure 3 présente l'évolution du diamètre de mobilité électrique des agrégats et du diamètre des particules primaires (D_{pp}) des suies en fonction de la concentration en dioxygène. Pour les combustibles liquides Huile DTE Medium et TBP/TPH, les granulométries évoluant de manière significative lors des essais, nous représentons les diamètres médians de mobilité électrique déterminés aux instants caractéristiques de ces expérimentations. On notera une diminution très notable du diamètre des agrégats et des particules primaires lorsque la concentration en dioxygène diminue. Cette évolution, en accord avec la diminution du facteur d'émission des suies précédemment reportée, supporte les conclusions de nos précédents travaux (Ouf et al., 2015) et confirme le lien pouvant être identifié entre la taille des particules primaires et le facteur d'émission des suies.

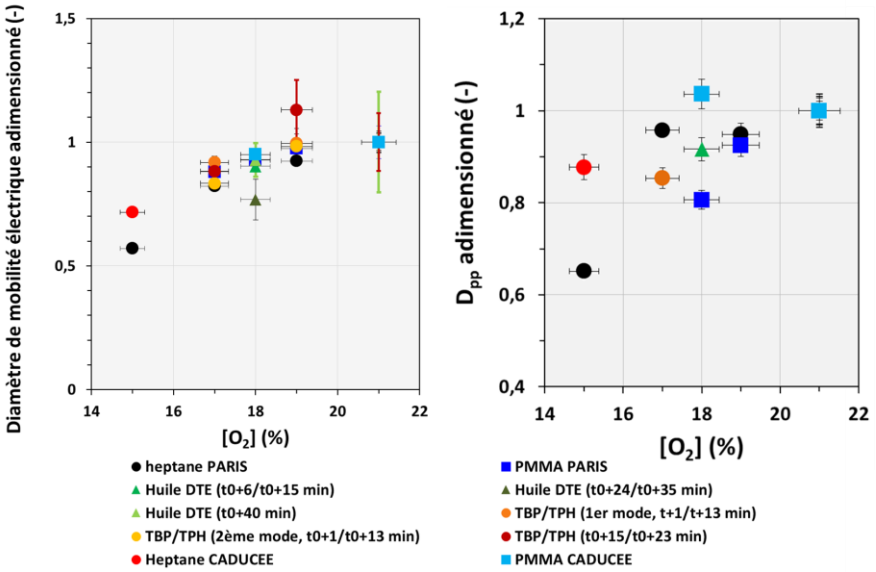

Figure 3 : évolution de la granulométrie des suies en fonction de la concentration en dioxygène

3.1. Effet de la sous-oxygénation sur la surface déposée des suies

La figure 4 présente l'évolution de la surface déposée des suies, sous une forme adimensionnée, en fonction de la concentration en dioxygène. Tout comme le facteur d'émission et les diamètres caractéristiques des suies, la surface déposée diminue elle aussi lorsque la concentration en dioxygène

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2021-24808 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

diminue. Cette diminution de la surface déposée, associée à la modification de la teneur en oxygène des suies, peut avoir des conséquences non négligeables, tout particulièrement pour des problématiques de quantification des suies (Kort et al., 2020) ou encore lors du dépôt des suies sur des équipements électriques pouvant occasionner leur dysfonctionnement en cas d'incendie.

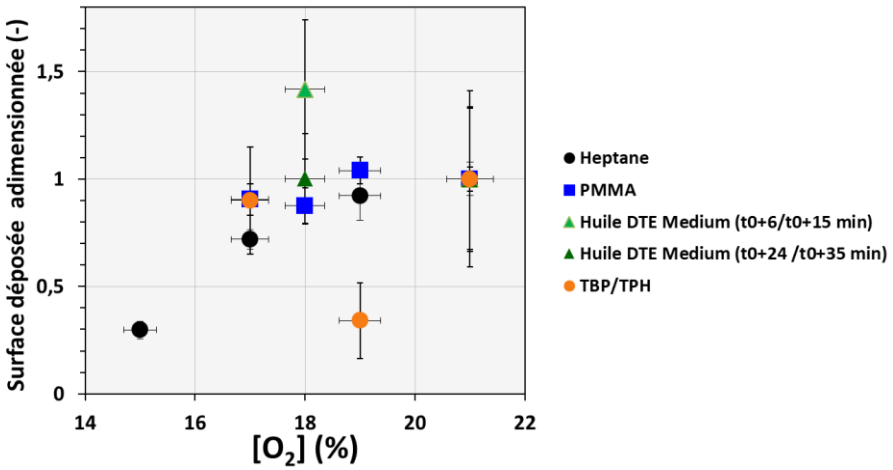

Figure 4 : évolution de la surface déposée des suies en fonction de la concentration en dioxygène

4. CONCLUSION

Les résultats obtenus mettent en évidence une influence très notable, pour l'ensemble des combustibles et pour les deux échelles de foyer considérées, de la concentration en dioxygène du gaz comburant sur la production des suies. Le facteur d'émission et les diamètres médians caractérisant les suies (agrégats et particules primaires) diminuent ainsi de manière très notable lorsque la concentration en dioxygène diminue. L'augmentation de la teneur en oxygène des suies produites en sous-oxygénation et l'aspect visuel des flammes (très bleutées à faible teneur en [O_2]) viennent supporter l'hypothèse, relativement contre-intuitive, de conditions propices à l'oxydation des suies en milieu sous-oxygéné. Les résultats de cette première étude ouvrent la voie à de plus amples développements, en particulier afin de proposer une méthodologie de prise en compte des effets de sous-oxygénation mais aussi d'échelle du foyer qui à ce jour ont très peu été étudiés. D'ores et déjà, les résultats obtenus pour des foyers de moins de 50 cm mettent en évidence des modifications très notables dans la production et les caractéristiques des suies, laissant supposer des comportements thermiques, électriques et chimiques dépendant des conditions d'incendie.

REMERCIEMENTS

Une partie de ces essais a pu être réalisée grâce à l'aide précieuse du SA2I/LEF de l'IRSN. Le CINaM est par ailleurs remercié pour l'analyse XPS. Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme commun LIMA (Les Interactions Média Aérosol) entre l'IRSN et le CNRS/LRGP.

RÉFÉRENCES

Alibert, D., Coutin, M., Mense, M., Pizzo, Y., & Porterie, B. (2017). Effect of oxygen concentration on the combustion of horizontally-oriented slabs of PMMA. *Fire Safety Journal*, *91*(March), 182–190. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.051

Bourrous, S., Bouilloux, L., Ouf, F.-X., Lemaitre, P., Nerisson, P., Thomas, D., & Appert-Collin, J. C. (2016). Measurement and modeling of pressure drop of HEPA filters clogged with ultrafine particles. *Powder Technology*, *289*. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.020

Kort, A., Ouf, F.-X., Gelain, T., Malet, J., Lakhmi, R., Breuil, P., & Viricelle, J.-P. (2020). Etude de l'effet de la tension de polarisation sur la réponse d'un capteur résistif de suies. *Congrès Français Sur Les Aérosols CFA 2020*.

Lintis, L., Ouf, F., Parent, P., Ferry, D., & Laffon, C. (2021). *Quantification and prediction of water uptake by soot deposited on ventilation filters during fire events*. *403*(June 2020). https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123916

Ouf, F.-X., Mocho, V.-M., Pontreau, S., Wang, Z., Ferry, D., & Yon, J. (2015). Physicochemical properties of aerosol released in the case of a fire involving materials used in the nuclear industry. *Journal of Hazardous Materials*, *283*, 340–349. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.043

Ouf, F. X. (2016). *Habilitation à diriger les recherches : Impact des aérosols émis lors d'un incendie sur le confinement des installations nucléaires*. Université de Rouen.

Peatross, M., & Beyler, C. (1997). Ventilation Effects On Compartment Fire Characterization. *Fire Safety Science*, *5*, 403–414. https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.5-403

Piller, M., & Coutin, M. (2017). Effects of smoke and thermal stress on electrical equipment failure. *15th Internation Post-Conference Seminar on Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations*, *SMiRT 24*, 1–15.