

ETUDE DE L'EFFET DE LA TENSION DE POLARISATION SUR LA REPONSE D'UN CAPTEUR RESISTIF DE SUIES

A. Kort^{*1,2}, F-X. Ouf¹, T. Gelain¹, J. Malet¹, R. Lakhmi², P. Breuil², J-P. Viricelle²

¹Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSN-RES, SCA, Gif-sur-Yvette, 91192, France

²Ecole Nationale Supérieure des Mines, SPIN-EMSE, CNRS : UMR5307, LGF, 42023 Saint Etienne, France

*amel.kort@irsn.fr

TITLE

Study of the polarization voltage effect on a resistive soot sensor response

RESUME

Au cours d'un incendie dans une Installation Nucléaire de Base (INB), les principales conséquences concernant les aérosols sont la mise en suspension de particules radioactives et la production de suies. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une thèse portant sur l'étude du dépôt des suies afin de prédire les quantités d'aérosols participant au colmatage des filtres à Très Haute Efficacité (THE). L'objectif final est de développer un dispositif multi-capteurs pour la quantification, en continu, des suies déposées sur les parois d'une INB en situation d'incendie. Cette communication présente la qualification, à différentes tensions de polarisation, du capteur résistif qui sera utilisé pour la collecte et la détection des suies.

ABSTRACT

During a fire in a basic nuclear facility, the main consequences concerning aerosols are the production of suspended radioactive particles and of a large amount of soot. This work is part of a PhD dealing with the study of soot deposition during a fire, which is essential for the prediction of aerosol quantities that can clog high efficiency particulate air filters. For this purpose, a multi-sensor device will be developed for real time measurement of aerosol deposition, in a room during a fire. The aim of this paper is to present the qualification, at different polarization voltages, of the resistive sensor that will be used for the collection and detection of soot particles.

MOTS-CLÉS: suies, dépôt, capteur résistif, incendie / **KEYWORDS:** soot, deposition, resistive sensor, fire

1. INTRODUCTION

Dans le cadre d'un projet commun de recherche avec Orano sur des feux de mélanges solvants/acide nitrique contaminés par du plutonium, la thèse dans laquelle s'inscrit ce travail vise à quantifier, en temps réel, les masses de suies déposées sur les parois du local incendié grâce à un dispositif métrologique multi-capteurs. À ce jour, il n'existe pas de capteurs actifs qui permettent de déterminer, en temps réel, la quantité de suies déposées, par unité de surface, sur les parois d'un local au cours d'un incendie.

À cause de la complexité des phénomènes rencontrés en cas d'incendie dans un local confiné et faiblement ventilé d'une installation telle qu'une INB, les données expérimentales dans la littérature, en termes de masse de suies déposées, sont limitées à des études dans des conditions contrôlées à petite échelle (Riahi, 2012), ou reposant sur des moyens métrologiques limités (Decoster, 2017). De telles données s'avèrent cependant indispensables afin de juger de la pertinence des modèles de dépôt d'aérosols implémentés dans les codes de calcul incendie actuels (FDS, ISIS, OpenFoam...).

Les capteurs de suie résistifs pourraient être une solution prometteuse pour la détermination de la quantité de suies déposées. Ces capteurs sont principalement utilisés dans le secteur automobile (Grondin et al., 2015), mais ont récemment été utilisés par Mensch et al. pour quantifier les dépôts de suie sur des surfaces en conditions d'incendie (Mensch et al., 2018). Bien que ce type de capteur soit actuellement utilisé pour le diagnostic embarqué (On-Board Diagnostic (OBD)) des véhicules diesels, sa principale limitation réside, à ce stade, dans son incapacité à délivrer une information quantitative et absolue de la masse de particules déposée à sa surface.

Le principe de ces capteurs repose sur la mesure de conductance au cours du dépôt de particules. Ce dernier étant de nature conductrice, il induit une augmentation de la conductance lors de la formation de ponts entre les électrodes constituant le capteur.

Cependant, la conversion précise de la réponse actuelle du capteur en masse de suie accumulée est difficile. Par ailleurs, il convient de s'assurer que le dépôt sur le capteur est lié à des mécanismes naturels de dépôt et n'est pas provoqué de façon artificielle par la tension de polarisation appliquée. L'effet de la polarisation sur la masse effective déposée sur le capteur est donc évalué dans ce travail. Les résultats présentés dans cette communication visent à déterminer l'effet de la tension de polarisation sur la structure du dépôt.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Principe de fonctionnement et fabrication du capteur résistif

Le capteur résistif (Figure 1) est basé sur les propriétés conductrices des suies. Son élément sensible est composé d'électrodes interdigitées (Interdigitated Electrodes (IDE)) gravées optiquement sur du platine déposé par sérigraphie sur un substrat en alumine. Cet élément sensible est relié aux plots de soudure par des pistes en or sur lesquelles un film diélectrique est sérigraphié. Ce film sert à protéger les pistes en or mécaniquement et électriquement.

Le principe de fonctionnement du capteur repose sur la formation de « ponts » de suies lors de leur dépôt entre les électrodes conductrices séparées de quelques dizaines de micromètres (Grondin et al., 2015). En l'absence de suie, la conductance mesurée entre les électrodes correspond à celle de l'alumine (conductance proche de zéro). Lors de la formation de ces ponts, la conductance du capteur augmente et permet un suivi qualitatif de la quantité de suies déposées sur le capteur (Bartscherer & Moos, 2013 ; Feulner et al., 2015 ; Fragkiadoulakis et al., 2015 ; Hagen et al., 2014). Au-delà d'une certaine masse déposée, le signal de conductance tend vers une valeur asymptotique dite de « saturation » et dont l'origine physique est encore peu décrite. Afin de revenir à une sensibilité satisfaisante de ce capteur « saturé », la face sensible du capteur est alors régénérée en brûlant les suies à l'aide d'une résistance chauffante sérigraphiée sur la face arrière du capteur (à une température proche de 650°C).

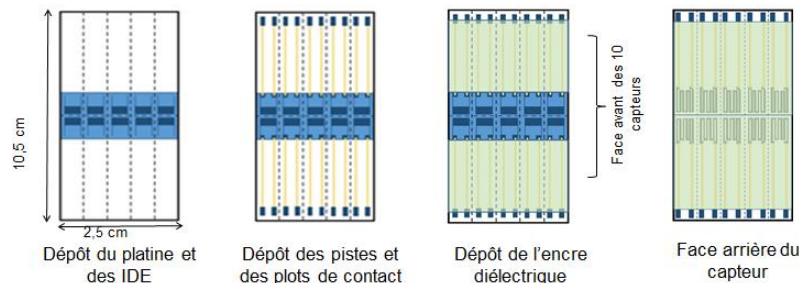


Figure 1 : Étapes de fabrication des capteurs résistifs

2.2. Banc expérimental

Pour déterminer l'effet de la tension de polarisation sur la réponse du capteur, il faut tout d'abord contaminer le capteur dans un banc dédié à la génération et au dépôt de suies (Figure 2).

Le banc de génération de suies est constitué d'un générateur de particules (mini-CAST) connecté à un tube en verre de 5 cm de diamètre. Les conditions du mini-CAST sont les suivantes : un débit de propane de 3,6 l/h, un débit d'air de 90 l/h, un débit d'azote de 0 l/h et un débit d'air de dilution de 1200 l/h se basant sur les travaux de (Yon et al., 2015).

Les suies produites sont conditionnées à une température de 150°C avec un four tubulaire. Cette température a été choisie car elle nous permet d'évaluer le comportement du capteur à une température proche de celle des parois lors d'un incendie avec différents types de flux de particules de combustion. Le capteur est placé au sein du tube en verre en sortie de ce four et une mesure SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) est réalisée en aval de deux systèmes de dilution Palas VKL10. La mesure de la conductance est réalisée à l'aide d'un multimètre Keithley 6517 A, contrôlé par un ordinateur via un programme LabVIEW. Afin d'étudier l'effet de cette tension sur la réponse du capteur, différentes tensions de polarisation comprises entre 0,1 V et 10 V ont été appliquées.

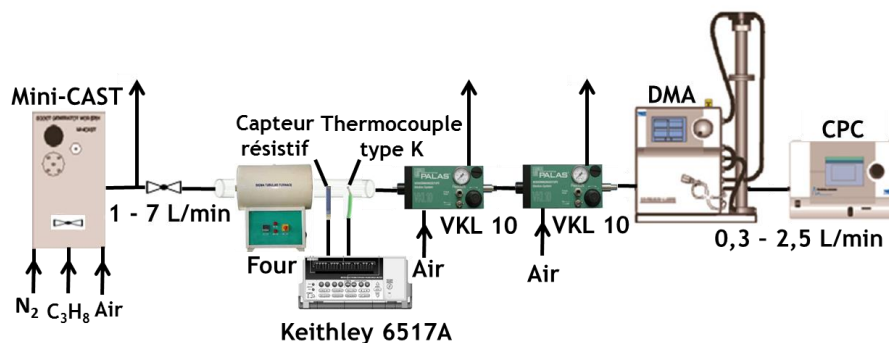


Figure 2 : Banc de génération et de dépôt de suies

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1. Répétabilité de la réponse du capteur

La répétabilité de la réponse du capteur a été étudiée pour le point de fonctionnement PF1. Les suies auxquelles le capteur est exposé sont générées avec une source stable et possèdent les caractéristiques suivantes : une concentration en nombre égale à $9.10^6 \pm 10 \%$ ($\#/cm^3$), un diamètre médian de mobilité électrique de 208 ± 20 nm et un écart-type géométrique de $1,6 \pm 0,12$.

Le signal délivré correspond à la conductance entre les électrodes de mesure en fonction du temps. Étant donné le balayage continu du capteur par un flux de particules lors des mesures, la fin de la régénération du capteur a été choisie comme point d'origine. Dix mesures successives ont été réalisées à une tension de polarisation de 10 V et la figure 3 présente la valeur moyenne de conductance ainsi obtenue. L'écart-type relatif ou coefficient de variation (écart-type divisé par la valeur moyenne de la conductance) est également représenté sur cette figure en fonction du temps d'exposition.

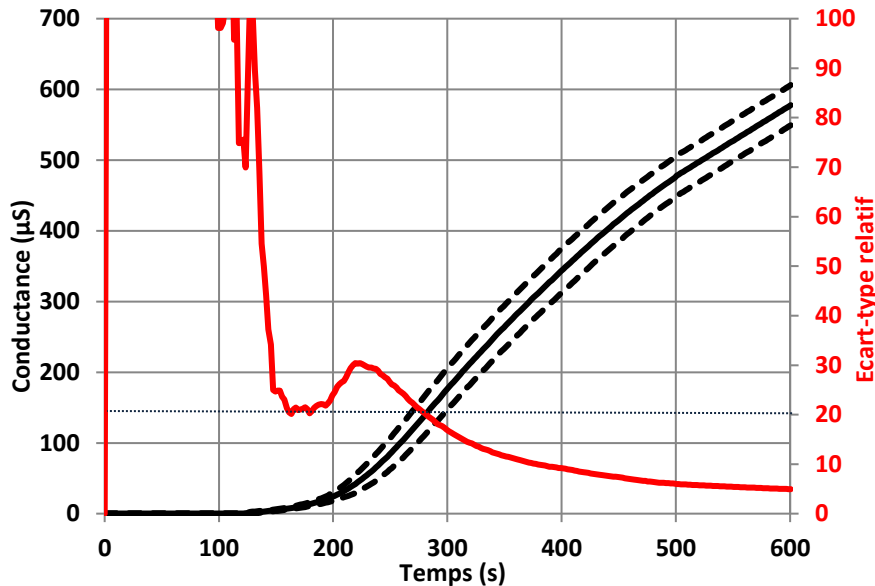


Figure 3 : Évolution de la conductance moyenne et du coefficient de variation, associés à 10 mesures identiques, en fonction du temps d'exposition (origine prise à la fin de la phase de régénération).

On remarque que la réponse du capteur est répétable, présentant un écart-type relatif inférieur à 20 % pour des conductances supérieures à 150 µS. Les différences observées pour des conductances inférieures à 150 µS sont dues au caractère pseudo-aléatoire du dépôt lors de la phase de formation des ponts dite de « percolation ».

3.2. Effet de la tension de polarisation sur la réponse du capteur

Afin d'étudier l'effet de la tension de polarisation sur la réponse du capteur (figure 4), un même capteur a été exposé aux suies dans les mêmes conditions mais pour différentes tensions de polarisation comprises entre 0,1 V et 10 V. La conductance a alors été enregistrée pendant 600 s. Avant chaque changement de tension de polarisation, le capteur a été régénéré.

Les valeurs initiales de conductance de la Figure 4 correspondent à celle mesurée à la fin de la phase de régénération du capteur, soit un capteur propre de toute suie entre les électrodes de mesure.

On peut distinguer 3 régimes : un régime de « percolation pure » lorsque la tension de polarisation est inférieure ou égale à 1 V, un régime « intermédiaire » entre 2 V et 4 V et un régime purement « dendritique » entre 6 V et 10 V.

Ainsi, pour des tensions de 0,1 V et 1 V, on observe un fonctionnement par paliers avec des augmentations brusques de la conductance. Les forces électrostatiques, qui ont tendance à aligner les particules de suies conduisant à la formation de dendrites parallèles les unes aux autres (ponts entre les électrodes), ne sont pas prédominantes. Le dépôt est alors moins structuré et la création de jonctions entre les électrodes ne se fait pas de façon continue mais dès lors qu'un amas de particules a permis la jonction entre les électrodes.

Entre 2 V et 4 V, on observe un régime mixte commençant par un palier, suivi d'une augmentation progressive de la conductance.

Pour des tensions supérieures ou égales à 6 V, la tension progresse de façon plus continue. Les augmentations de conductance sont moins brusques. La force électrostatique étant dans ce cas très influente

sur le dépôt, elle conduit à la croissance de plusieurs dendrites en parallèle. Les augmentations continues de la conductance correspondent alors aux dendrites qui forment successivement des ponts entre les électrodes.

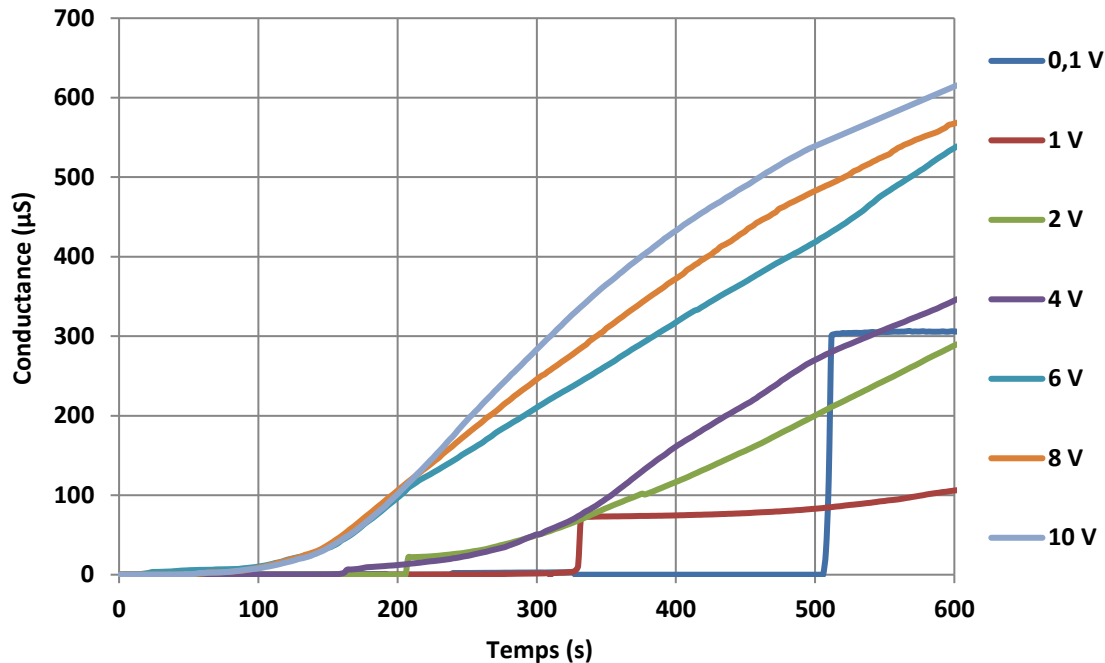


Figure 4 : Évolution de la conductance en fonction du temps d'exposition (origine prise à la fin de la phase de régénération) pour différentes tensions de polarisation.

4. CONCLUSION

La réponse électrique du capteur a été évaluée à différentes tensions de polarisation à une température proche de celle des parois lors d'un incendie. On distingue alors 3 régimes : un régime de « percolation pure » lorsque la tension de polarisation est inférieure ou égale à 1 V, un régime « intermédiaire » entre 2 V et 4 V et un régime purement « dendritique » entre 6 V et 10 V.

L'évaluation de l'influence de la tension de polarisation est une étape fondamentale car elle nous a permis de conclure que le capteur ne pourrait donc être utilisé qu'à partir d'une tension de polarisation de 6 V. Cependant, il conviendra aussi de s'assurer que cette tension n'a pas d'effet sur la masse totale de particules déposée sur le capteur. Dans le cas contraire, cet effet sera quantifié et intégré dans la procédure d'étalonnage du capteur.

REFERENCES

- Bartscherer, P., Moos, R. (2013). *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2, 95–102.
- Decoster, L. (2017). Thèse de doctorat de l'université d'Aix-Marseille.
- Feulner, M., Hagen, G., Muller, A., Schott, A., Zollner, C., Brüggemann, D., & Moos, R. (2015). *Sensors (Switzerland)*.
- Floyd, J., Overholt, K., & Ezekoye, O. (2014). *Fire Safety Science-Proceedings of the eleventh international symposium*, 376-388. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.11-376>.
- Fragkiadoulakis, P., Mertzis, D., Geivanidis, S., & Samaras, Z. (2015). 6th BETA CAE International Conference.
- Grondin, D., Breuil, P., Viricelle, J. P., & Vernoux, P. (2015). *Procedia Engineering*. 120, 1237-1240.
- Hagen, G., Müller, A., Feulner, M., Schott, A., Zöllner, C., Brüggemann, D., & Moos, R. (2014). *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.646>
- Karanasiou, A., Minguillón, M. C., Viana, M., Alastuey, A., & Putaud, J. (2015). *Atmospheric Measurement techniques Discussions*, 8, 9649-9712.
- Mensch, A., & Cleary, T. (2018). National Institute of Standards and Technology Technical Note 1985, 43. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1985>.
- Riahi, S. (2012). PhD thesis of the Faculty of The School of Engineering and Applied Science of The George Washington University.
- Yon, J., Bescond, A., & Ouf, F. X. (2015). *Journal of Aerosol Science*, 87, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.05.003>