

LES ACQUIS SUR LE COLMATAGE DES FILTRES À TRÈS HAUTE EFFICACITÉ par les aérosols formés lors d'un incendie

Victor-Manuel MOCHO

Laboratoire d'expérimentations en confinement, épuration et ventilation

François-Xavier OUF

Laboratoire de physique et de métrologie des aérosols

L'IRSN et Areva NC mènent actuellement un programme d'intérêt commun de recherche sur l'incendie, dont l'un des objectifs est d'améliorer les connaissances sur le colmatage des filtres de très haute efficacité (THE) et de développer un modèle empirique de colmatage de ces filtres par des aérosols de combustion ; le modèle recherché doit, autant que possible, être indépendant de la nature du combustible et doit pouvoir être intégré dans un code de calcul traitant les interactions entre la ventilation et l'incendie. Cet article présente l'influence de différents facteurs « directs », tels que la vitesse de filtration, la masse surfacique d'aérosols déposée, le diamètre des particules issues de la combustion, la teneur en condensats des aérosols, et de facteurs « indirects », tels que le débit d'air d'alimentation du foyer et sa teneur en oxygène, lesquels influencent l'évolution de la résistance aéraulique d'un filtre colmaté.

L'analyse du risque d'incendie dans une installation nucléaire conduit en particulier à évaluer les conséquences de l'incendie sur le confinement des substances radioactives et à déterminer les quantités de matières radioactives susceptibles d'être rejetées à l'environnement. Les dispositions à prendre (sectorisation des locaux, conduite de la ventilation, par exemple) pour réduire ces conséquences doivent donc être tout particulièrement étudiées. Parmi les équipements de ventilation des installations nucléaires dédiés à la maîtrise des rejets de contamination, les dispositifs d'épuration et tout particulièrement le dernier niveau de filtration (DNF), composé de filtres THE, constituent un élément majeur.

Outre des contraintes thermiques, le développement d'un incendie dans une installation ventilée est susceptible de provoquer, sur les dispositifs d'épuration, des contraintes aérauliques et des contraintes mécaniques liées aux variations de pression lors de phases transitoires, inflammation et extinction en particulier.

Les aérosols sont également à prendre en considération car ils influencent notamment le colmatage des filtres THE présents dans les réseaux de ventilation ; ces aérosols sont, soit uniquement des produits de la combustion, soit un mélange composé de produits de combustion et de produits contaminants.

Le cas étudié ici, le plus courant, correspond à celui où les aérosols sont uniquement des aérosols de combustion.

Dans une installation nucléaire, le colmatage des filtres peut avoir deux effets néfastes sur le maintien du confinement :

- il risque d'entraîner une rupture mécanique du médium filtrant et donc une perte partielle ou totale de l'efficacité du filtre ;
- il risque de provoquer une chute du débit d'air extrait du local siège de l'incendie, pouvant conduire à un passage en surpression du local et à un déséquilibre de la cascade de dépressions dans l'ensemble de l'installation.



Figure 1 Installation d'essais BANCO.

Le moyen le plus réaliste d'évaluer si de tels effets peuvent intervenir est le recours à des codes de calculs qualifiés traitant de l'interaction entre la ventilation et l'incendie. Pour ce faire, il est en particulier nécessaire de disposer de modèles décrivant le colmatage des filtres THE.

À ce titre, l'IRSN et Areva NC mènent depuis plusieurs années un programme d'intérêt commun de recherche afin d'améliorer les connaissances dans les domaines de l'incendie et de l'interaction entre l'incendie et le réseau de ventilation.

Conditions opératoires relatives aux travaux sur le colmatage des filtres en cas d'incendie

Les travaux sur le colmatage des filtres THE ont pour objectif de construire un modèle de colmatage indépendant du scénario d'incendie, en ne tenant compte que des facteurs « directs » du colmatage. Pour ce faire, l'IRSN dispose du banc d'essais « BANCO » (figure 1), spécifiquement dimensionné pour permettre des expériences analytiques sur le colmatage de filtres THE par des aérosols issus de la combustion de différents matériaux [Mocho et Laborde, 2002]. Il comporte une enceinte d'environ 1 m^3 , dans laquelle sont placées les charges de combustible. Cette enceinte est raccordée à un conduit d'extraction dans lequel un ventilateur assure une circulation d'air. Le conduit se divise en deux voies calorifugées, dont les débits d'air varient respectivement de $50 \text{ m}^3/\text{h}$ à $100 \text{ m}^3/\text{h}$ et de $50 \text{ m}^3/\text{h}$ à $500 \text{ m}^3/\text{h}$. Cette configuration offre la possibilité de réaliser des essais de colmatage pour différentes vitesses de filtration, tout en assurant un même débit de combustion, ceci afin de

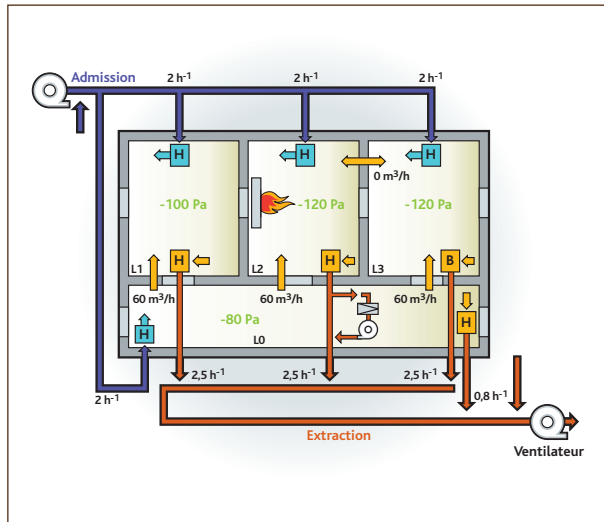


Figure 2 Installation d'essais DIVA.

ne pas modifier les caractéristiques des suies produites. Sur chaque voie est positionné un caisson de filtration recevant un filtre THE, dont on étudie le colmatage.

L'instrumentation du banc d'essais permet de mesurer les contraintes thermiques et aérauliques (perte de charge) au niveau du filtre THE testé, mais également de déterminer les caractéristiques de la dégradation thermique du combustible et les aérosols produits. Pour cela, le banc d'essais est équipé de thermocouples placés entre le foyer de combustion et le filtre THE testé, de capteurs électroniques de pression pour la mesure de la perte de charge aux bornes du filtre et d'une balance pour mesurer la perte de masse du combustible. La concentration massique en aérosols de combustion de l'air est déterminée, soit par des prélèvements séquentiels sur filtres, soit par l'emploi en série d'un système de dilution (DEKATI FPS 4000) et d'une microbalance (R&P TEOM) assurant une mesure en continu. La distribution granulométrique des aérosols, entre 30 nm et $10 \mu\text{m}$, est mesurée après dilution à l'aide d'un granulomètre DEKATI ELPI basse pression.

De plus, la morphologie des particules est déterminée par l'examen de clichés de microscope électronique à transmission (MET), à partir de prélèvements spécifiques. Enfin, les teneurs en eau et en condensats des aérosols sont obtenus par la méthode Karl Fischer (par titration chimique) et par évaporation/dessiccation à l'étuve.

En parallèle, des essais réalisés dans l'installation DIVA (représentée sur la figure 2) permettent de déterminer l'influence du changement d'échelle sur les aérosols produits lors de la combustion de composants électriques et son incidence sur le colmatage d'un filtre THE.

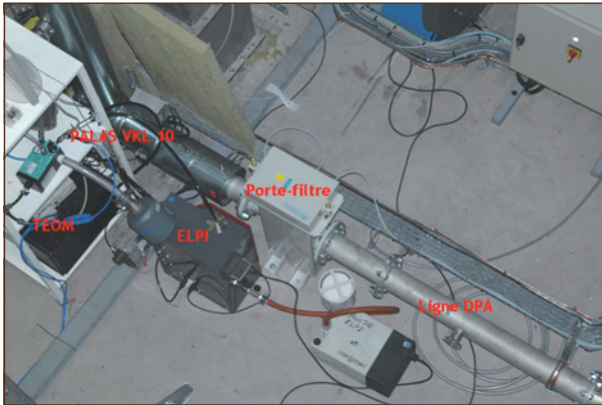


Figure 3 Déviation DPA de l'installation DIVA.

L'installation DIVA est constituée de quatre locaux adjacents et d'un réseau de ventilation modulable permettant d'étudier différents scénarios d'incendie [Saux *et al.*, 2005]. Un conduit monté en dérivation sur le réseau d'extraction d'air du local siège du feu permet d'étudier le colmatage d'un filtre THE, à un débit de filtration de 50 m³/h. L'instrumentation mise en œuvre dans ce conduit (**figure 3**) est équivalente à celle du banc d'essais BANCO et permet la mesure des contraintes thermiques et des contraintes aérauliques au niveau du filtre THE testé, ainsi que la caractérisation de la dégradation thermique du combustible et des aérosols produits. De plus, des mesures supplémentaires de températures, de pressions et d'analyses de gaz sont effectuées dans le local siège du feu. Les filtres étudiés dans ces deux installations précitées sont des filtres plissés THE de la société CAMFIL-FARR utilisés dans des installations nucléaires, à base de fibre de verre, du type doubles dièdres de 6 m² de surface réelle de filtration (référence 1501.37.00) ; leur débit nominal de filtration est de 450 m³/h.

Dans l'installation BANCO, différents matériaux combustibles solides ont été étudiés : le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), qui est d'usage courant dans certaines installations industrielles et présente une dégradation thermique aisée (absence de résidus de combustion) relativement bien connue, ainsi que le Lexan et le PVC, tous deux en association à 33 % et à 50 % (en masse) avec du PMMA, afin de favoriser leur combustion.

La caractérisation du colmatage d'un filtre consiste à déterminer l'évolution de la résistance aéraulique R du filtre en fonction de la masse M_{ae} d'aérosols déposés ; par analogie avec un filtre vierge, cette résistance est généralement définie, dans le domaine de la modélisation des réseaux de ventilation [Laborde *et al.*, 1994], par la relation : $R = (\mu_0 \Delta P) / (\mu \cdot Q_v)$, où ΔP représente la perte de charge du filtre (Pa), Q_v le débit volumique de filtration (m³/s), μ_0 et μ la viscosité dynamique du fluide (Pa.s), respectivement à 20 °C

et à sa température dans le filtre. Au cours des essais réalisés, la vitesse de filtration a été maintenue constante durant le colmatage.

Principaux résultats expérimentaux

Au cours de l'ensemble des travaux menés en commun par l'IRSN et Areva NC, les principaux paramètres ayant une influence sur le colmatage des filtres ont été identifiés et il a été mis en évidence qu'ils pouvaient être classés dans deux catégories distinctes. La première regroupe les paramètres dits « directs », car ils constituent des données de base caractéristiques du filtre ou des aérosols produits par l'incendie et sont donc susceptibles, même si leur détermination peut s'avérer délicate, d'être introduits dans un modèle de colmatage.

Ces paramètres sont liés aux filtres (caractéristiques du médium filtrant, de son pliage, de son éventuel précolmatage), au régime aéraulique de filtration (vitesse de filtration) et aux produits de combustion (masse surfacique déposée, granulométrie des particules élémentaires et des agrégats, morphologie des agrégats, teneur en eau et/ou en condensats). La seconde catégorie regroupe les paramètres dits « indirects » (flux thermique incident, débit de ventilation du foyer, teneur en oxygène de l'air, nature du combustible) ; ces derniers influencent essentiellement les paramètres « directs » caractérisant les aérosols de combustion et sont donc indirectement pris en compte dans le modèle.

Les **figures 4** et **5** présentent les effets de la vitesse de filtration, du débit de ventilation et de la concentration en oxygène [O₂] sur le colmatage d'un filtre THE par des aérosols issus de la combustion de PMMA.

Une diminution de la vitesse de filtration (**figure 4**) entraîne une augmentation du rapport des résistances aérauliques R/R_0 d'un filtre plissé THE (R_0 étant la résistance aéraulique du filtre vierge), pour une masse donnée d'aérosols déposés. Ceci est principalement lié à l'hétérogénéité initiale de l'écoulement d'air dans un filtre plissé et à l'arrangement des particules le long de la hauteur des plis, qui conduit à une réduction de la surface utile de filtration d'autant plus importante que la vitesse de filtration est faible [Del Fabbro, 2001].

Par ailleurs, une augmentation de la richesse du mélange combustible (rapport débit d'O₂ stœchiométrique/débit d'O₂ disponible), caractérisée par une diminution du débit ou de la concentration en oxygène [O₂] de l'air de ventilation du foyer (**figure 5**), conduit à une diminution du rapport des résistances aérauliques R/R_0 , pour une masse donnée d'aérosols déposés.

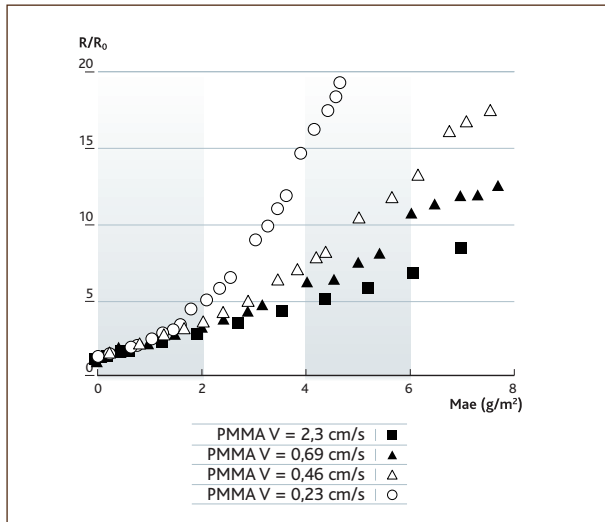


Figure 4 Influence de la vitesse de filtration sur le colmatage des filtres par des aérosols issus de la combustion de PMMA.

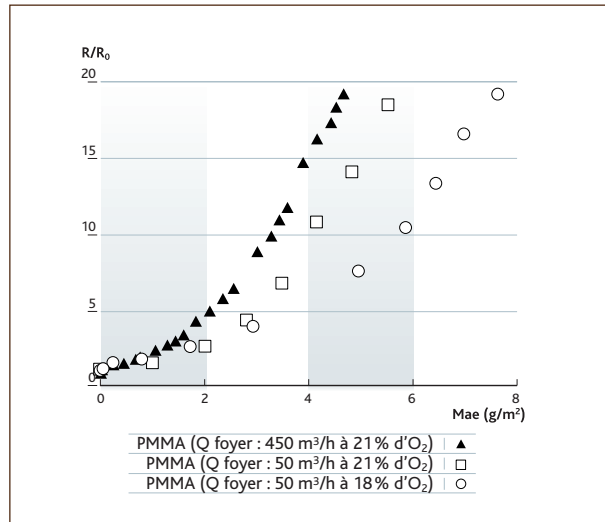


Figure 5 Influence du débit et de la concentration $[O_2]$ de l'air de ventilation du foyer de combustion sur le colmatage des filtres par des aérosols issus de la combustion de PMMA à une vitesse de filtration de 0,23 cm/s.

Combustible	Débit de ventilation (m³/h)	Taux de renouvellement du local feux (h⁻¹)	Surface de combustion (m²)	Richesse globale du mélange	Dimension caractéristique (nm)	Teneur moyenne en eau (%)	Teneur totale en condensats (%)
PMMA (100 %)	50	50	0,0625	0,5	51 ± 9	≈ 2	≈ 2
	450	450	0,0625	< 0,1	40 ± 8	≈ 2	≈ 2
PMMA/LEXAN (50 %/50 %)	50	50	0,0625	0,25	60 ± 12	≈ 2	≈ 2
	450	450	0,0625	< 0,1	48 ± 10	≈ 2	≈ 2
PMMA/PVC (50 %/50 %)	50	50	0,0625	0,25	77 ± 16	17	35
	450	450	0,0625	< 0,1	59 ± 13	16	25
Composants d'armoire électrique	50	50	0,16	0,8	64 ± 17	10	21
Armoire électrique (installation DIVA)	300	2,5	2,4	≈ 2	58 ± 9	non mesurée	> 25

Tableau 1 Caractéristiques des aérosols de combustion en fonction des conditions expérimentales.

Ceci est lié à une augmentation de la taille des particules primaires des agrégats qui composent les aérosols émis par le foyer de combustion, d'où l'importance de déterminer précisément les caractéristiques de ces agrégats [Mocho *et al.*, 2007].

Caractéristiques des aérosols de combustion émis

Les aérosols de combustion émis par les différents types de combustibles testés (PMMA seul, mélange PMMA et Lexan, mélange PMMA

et PVC ou encore mélange de composants d'une armoire électrique type) présentent des granulométries sensiblement similaires lorsque le régime de combustion correspond à un mélange pauvre (excès d'oxygène). Les aérosols émis sont composés d'agrégats de particules primaires. Ces agrégats sont très polydispersés (large spectre de diamètres) ; leur diamètre aérodynamique médian en masse est compris entre 0,7 µm-1,0 µm (faible ventilation du foyer de combustion) et 1,5 µm-1,8 µm (forte ventilation du foyer de combustion) et leur écart-type géométrique va de 3,5 à 5. Cependant, bien que la taille des agrégats et leur morphologie [Ouf *et al.*, 2008] soient sensiblement similaires, leur pouvoir colmatant est différent.

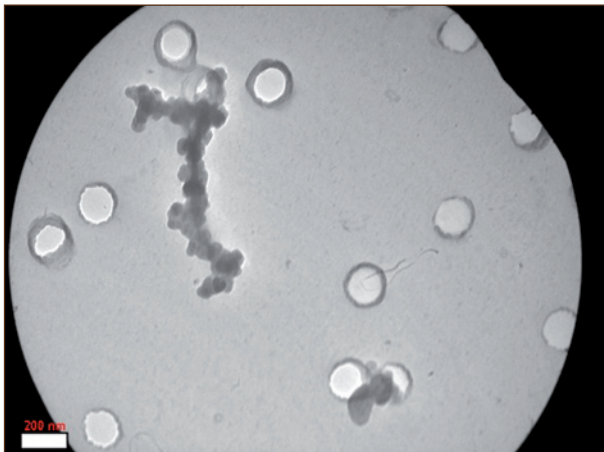


Figure 6 Agrégat de particules primaires d'environ 40 nm, issu de la combustion de PMMA pour une ventilation du foyer de 450 m³/h.

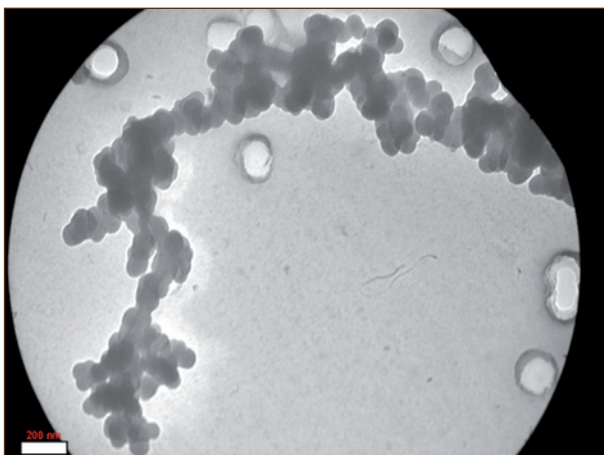


Figure 7 Agrégat de particules primaires d'environ 77 nm, issu de la combustion de PMMA/PVC pour une ventilation du foyer de 50 m³/h.

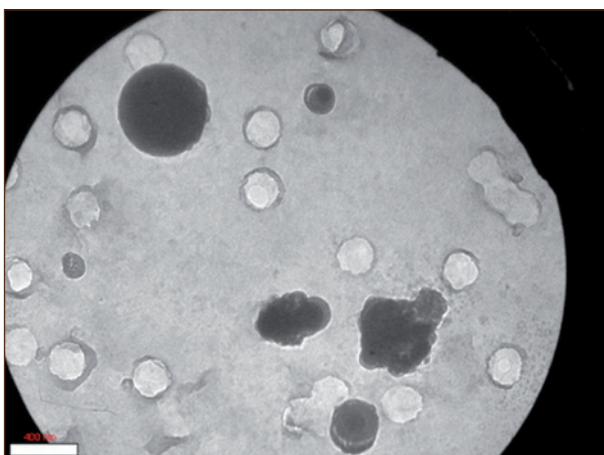


Figure 8 Particules issues de la combustion d'une armoire électrique type dans l'installation DIVA pour une ventilation du local de 300 m³/h (taux de renouvellement de 2,5 h⁻¹).

Ceci peut s'expliquer, d'une part, par la différence de taille des particules primaires constituant les agrégats, d'autre part, par leur nature plus ou moins « solide » ou « liquide » en fonction de la teneur en eau/condensats. En effet, une structure « dendritique » (cas du PMMA) offre une résistance à l'écoulement plus importante qu'une structure « sphérique ». De même, des aérosols de nature liquide (combustible contenant du PVC par exemple) sont moins colmatants que des aérosols solides de mêmes dimensions [Pénicot, 1998]. Lorsque le régime de combustion correspond à un mélange riche (déficit d'oxygène), les aérosols de nature liquide contiennent une proportion de condensats issus de vapeur de combustible imbrûlé plus importante. Par ailleurs, si le feu a lieu dans un local dont le taux de renouvellement d'air est faible (cas de l'installation DIVA), les interactions entre particules et imbrûlés peuvent être suffisamment importantes pour modifier la morphologie des aérosols. Les agrégats initiaux peuvent alors se recouvrir d'une « gangue » et perdre totalement leur morphologie de type « agrégat » au profit d'une morphologie de type « particule compacte », pouvant être composée à la fois d'une phase solide et d'une phase liquide.

Le **tableau 1** présente les caractéristiques des aérosols émis pour différents mélanges et conditions de combustion. À titre d'illustration, les **figures 6, 7 et 8** présentent trois photographies, prises au microscope électronique à transmission (MET), de particules issues de la combustion de PMMA et d'un mélange de PMMA/PVC (à 50%/50 % en masse) dans l'installation BANCO, et de la combustion d'une armoire électrique type dans l'installation DIVA ; ces aérosols sont constitués dans l'installation BANCO d'agrégats de particules élémentaires, respectivement d'environ 40 nm et 77 nm ; dans l'installation DIVA, il s'agit de particules compactes d'environ 220 nm ne présentant pas de structure de type agrégat.

Modèle de colmatage

Compte tenu de la complexité des mécanismes et des paramètres intervenant dans le colmatage des filtres THE par des aérosols de combustion, l'état actuel des connaissances ne permet pas de décrire ce colmatage par une loi phénoménologique. L'établissement d'une relation empirique, à partir des paramètres « directs », a été préféré.

Modèle empirique de colmatage des filtres THE

Dans le modèle empirique initial [Mocho *et al.*, 2004], le paramètre « direct » caractéristique des aérosols était le diamètre aéro-

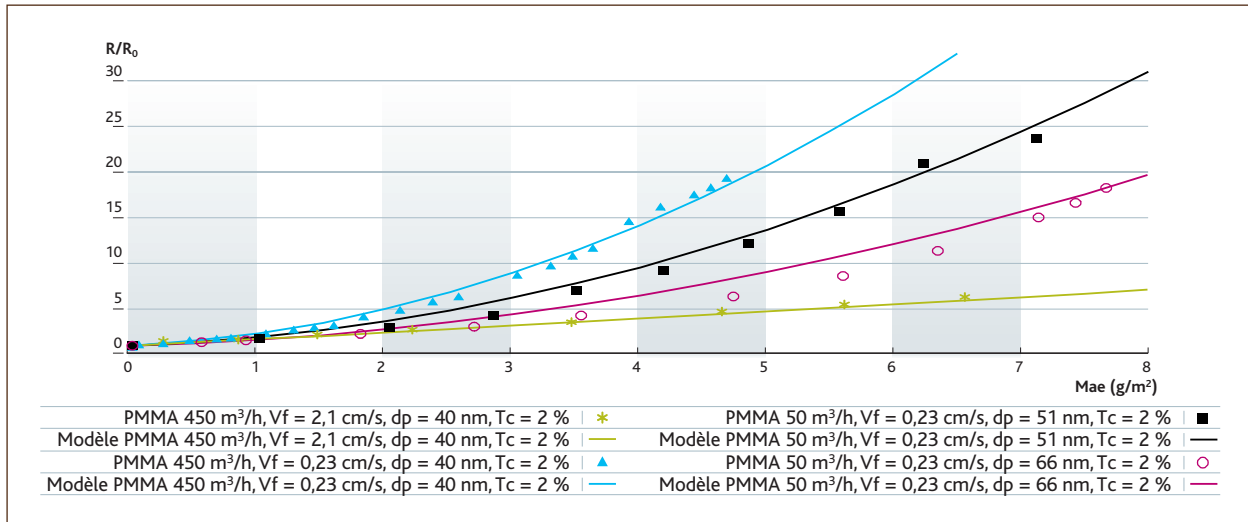


Figure 9 Comparaison entre le modèle et des résultats expérimentaux du colmatage de filtre THE par des aérosols de combustion de PMMA, pour différentes conditions d'essais.

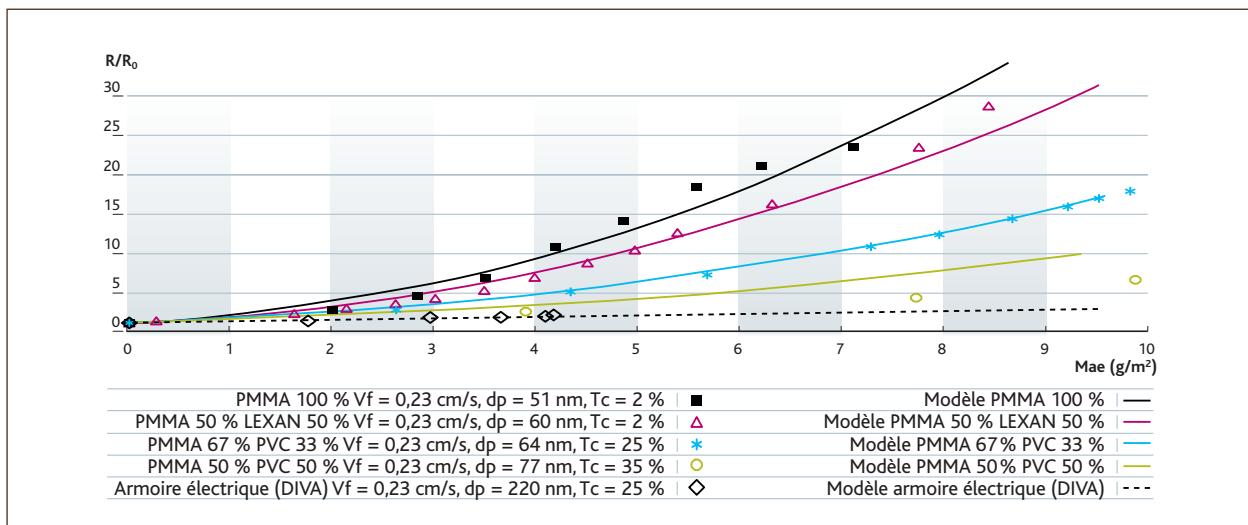


Figure 10 Comparaison entre le modèle et des résultats expérimentaux du colmatage de filtre THE par des aérosols de combustion pour différents combustibles.

dynamique médian en masse. Des travaux récents réalisés [Ouf et al., 2008] dans l'installation BANCO ont montré une corrélation entre le diamètre des particules primaires composant les agrégats et le couple de paramètres indirects « débit et concentration en oxygène [O₂] de l'air de ventilation du foyer ». Le diamètre aérodynamique médian en masse a donc été remplacé par le diamètre moyen des particules primaires des agrégats (lorsque la morphologie de l'aérosol de combustion est de type « agrégat ») ou par le diamètre équivalent en volume de la particule (lorsque la morphologie n'est pas de type « agrégat »). De plus, un facteur prenant en compte la teneur en eau et en condensats des aérosols déposés sur le filtre THE a été introduit dans la relation empirique de colmatage.

Cette dernière se présente sous la forme suivante :

$$\frac{R}{R_0} = 1 + a \cdot \left(1 - \frac{T_c}{100}\right) \frac{M_{ae}}{d_{pe}} + b \cdot \left[\left(1 - \frac{T_c}{100}\right) \frac{M_{ae}}{v \cdot d_{pe}}\right]^2$$

où R et R₀ représentent les résistances aérauliques du filtre colmaté et du filtre vierge (kg/s.m⁴), M_{ae} la masse surfacique d'aérosols déposés sur le filtre (g/m²), T_c la teneur en eau et en condensats des aérosols déposés (%), d_{pe} le diamètre moyen des particules élémentaires composant les agrégats ou le diamètre équivalent en volume de la particule (m), v la vitesse de filtration (m/s) et a, b des constantes expérimentales du modèle (indépendantes du combustible), a = 2,8.10⁻⁸ m³/g et b = 5,5.10⁻²¹ m⁸/(g².s²).

La **figure 9** montre le bon accord existant entre les résultats expérimentaux obtenus lors de la combustion de PMMA et le modèle empirique proposé lorsque la teneur en condensats est faible ($T_c = 2\%$).

À l'inverse, la **figure 10** souligne la surestimation du colmatage par le modèle empirique pour une teneur totale en condensats de 35 % (cas de la combustion d'un mélange PMMA/PVC 50%/50 %) ; pour les teneurs plus faibles ($2\% < T_c < 25\%$), le modèle représente correctement les résultats expérimentaux. L'écart observé pour la plus forte teneur en condensats s'explique par le fait que le dépôt sur le filtre ne peut plus être considéré comme « solide » (**figure 8**). Le dépôt d'aérosols solides (formation de dendrites) sur le filtre étant différent de celui d'un aérosol liquide (formation de ponts liquides) [Pénicot, 1998], le modèle proposé n'est donc plus valable.

Dans le cas d'un colmatage du filtre par des aérosols dont la morphologie n'est pas de type « agrégat » (cas d'une combustion sous-ventilée avec de fortes interactions aérosols/imbrûlés, avec formation d'une gangue autour de l'agrégat initial), la taille de l'aérosol final est plus importante et son pouvoir de colmatage est bien plus faible (à masse déposée égale) ; si cet aérosol tend vers un aérosol de nature liquide, son pouvoir colmatant dépendra également de paramètres physiques liés à sa nature chimique (viscosité et tension superficielle entre autres) ; le modèle de colmatage devra donc être aménagé en conséquence.

■ Conclusion

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de décrire le colmatage des filtres THE par des aérosols formés lors d'un incendie impliquant des combustibles solides, au moyen d'un modèle empirique prenant en compte l'influence de paramètres qualifiés de « directs » (type de filtre, masse des aérosols déposés, taille caractéristique des aérosols émis, teneur en eau et en condensats, vitesse de filtration). Cependant, bien que ce modèle soit indépendant du combustible utilisé, il n'est valable que pour des conditions de combustion conduisant à un aérosol dont le caractère « solide » n'est pas trop modifié par d'éventuels condensats (teneur totale en condensats des aérosols déposés sur le filtre THE $\leq 25\%$). À l'inverse, lorsque la teneur en eau et condensats s'avère élevée, il semble délicat d'établir une relation empirique de colmatage des filtres THE indépendante des caractéristiques physico-chimiques des aérosols, mais aussi de la nature des condensats qui est directement liée à la nature du combustible. Les perspectives d'amélioration dans ce domaine résident donc dans la détermination des caractéristiques de la phase condensable et dans la compréhension de l'interaction imbrûlés-aérosols pouvant jouer un rôle fondamental sur la nature des aérosols rejetés et par la même occasion sur le colmatage des filtres THE en situation réelle d'incendie ; de plus, il convient d'étudier l'influence d'une variation du débit de filtration durant la phase de colmatage, les travaux réalisés à ce jour l'ayant été à vitesse de filtration constante.

Références

- L. Del Fabbro (2001). Modélisation des écoulements d'air et du colmatage des filtres plissés par des aérosols solides. Thèse de doctorat, université Paris XII.
- J.-C. Laborde, J.-L. Peirano, G. Perrin, C. Prevost, S. Raboin, J. Vendel (1994). *Calculation code evaluating the confinement of a nuclear facility in case of fires*. 23rd DOE/NRC Nuclear air cleaning and treatment conference, Buffalo.
- V.-M. Mocho, A. Briand, J.-C. Laborde (1998). Influence de la vitesse de filtration sur le colmatage de filtres THE plissés pour différents types d'aérosols. 14^e Congrès français sur les aérosols, Paris, France.
- V.-M. Mocho, J.-C. Laborde (2002). Facteurs influençant le colmatage des filtres THE industriels par des aérosols formés en cas d'incendie. 18^e Congrès français sur les aérosols, Paris, France.
- V.-M. Mocho, L. Bouilloux, V. Renzi (2004). Facteurs influençant le colmatage des filtres THE industriels par des aérosols formés en cas de feux de différents matériaux. 20^e Congrès français sur les aérosols, Paris, France.
- V.-M. Mocho, L. Bouilloux, S. Gmajner (2007). Facteurs influençant le colmatage des filtres THE industriels par des aérosols formés en cas de feux de différents matériaux. Premières journées filtration des aérosols, Nancy, France.
- F.-X. Ouf, J. Vendel, A. Coppalle, M. Weill, J. Yon (2008). *Characterization of soot particles in the plumes of over-ventilated diffusion flames*. *Combust. Sci. and Tech.*, 180, 674-698.
- P. Pénicot (1998). Étude de la performance de filtres à fibres lors de la filtration d'aérosols solides ou liquides submicroniques. Thèse de doctorat, INP de Lorraine.
- W. Saux, H. Pretrel, J.-M. Such (2005). *The DIVA « multi-room » experimental facility and the DIVA-0 program*. 8th International Symposium on Fire Safety Science, Pékin, Chine.