

Les filtres sont constitués de nappes plissées de fibres de verre juxtaposées.

La filtration des aérosols radioactifs : un problème de taille

CONTEXTE

La plupart des activités industrielles produisent des aérosols. Dans les installations nucléaires, ils peuvent être radioactifs. Dans certaines d'entre elles liées au cycle du combustible, plusieurs niveaux de filtration sont alors mis en œuvre pour éviter qu'ils

ne se dispersent dans l'atmosphère, tant intérieure qu'extérieure. Le dernier niveau d'épuration de l'air est assuré par des filtres de très haute efficacité (THE), qui doivent rester opérationnels y compris en cas d'incendie.

Cahier partenaire
réalisé avec

IRSN

www.irsn.fr

Depuis une vingtaine d'années, l'IRSN décrypte la physique des aérosols pour comprendre les risques de colmatage des filtres de très haute efficacité (THE). Après avoir proposé une approche empirique, basée sur des expériences réalistes, les chercheurs ont développé un modèle phénoménologique dans le but d'évaluer les performances des filtres en toute situation.

En mars 2020, la pandémie de Covid-19 nous a rappelé que la filtration d'aérosols, en l'occurrence des gouttelettes, n'avait rien de trivial. Bon nombre d'entre nous entendaient alors parler d'aérosols pour la première fois. Rappelons-en la définition : c'est un ensemble de particules, solides ou liquides, en suspension dans l'air, autrement dit pour lesquelles la gravité est négligeable en regard des autres forces auxquelles elles sont soumises, du fait de leur petite taille, en général comprise entre quelques nanomètres (nm ou 10^{-9} m) et quelques dizaines de micromètres (μm ou 10^{-6} m). Dès mi-mars, l'IRSN a été un des laboratoires sollicités par l'Afnor pour évaluer le degré de protection offert par les masques en tissu. « *Nous avons étudié la filtration de 233 matériaux en fibres textiles naturelles ou synthétiques pour des aérosols susceptibles de transporter le virus comme les gouttelettes de salive, explique Soleiman Bourrous, spécialiste en filtration des aérosols à l'IRSN. Nous avons aussi mesuré leur respirabilité.* »

Pourquoi l'IRSN ? En raison de ses compétences reconnues en matière de filtration d'aérosols. Ces particules mesurent en général entre 0,5 μm et 5 μm de diamètre. Leur formation accompagne la plupart des activités humaines. Elle est associée aux phénomènes de friction, lors du frottement de notre peau sur nos vêtements, du roulement des pneus d'une voiture sur la chaussée, mais aussi aux réactions de combustion, entre autres. Dans une installation

nucléaire, certains des aérosols sont radioactifs. Ils constituent un vecteur important de la contamination.

Quels sont les locaux concernés ? Ceux des centrales nucléaires, des laboratoires de recherche manipulant des substances radioactives, ceux des usines de fabrication du combustible où des poudres micrométriques sont compactées, des usines de retraitement ou encore lors des opérations de démantèlement. Et que l'on s'intéresse à un masque anti-Covid ou un filtre très haute efficacité (THE) homologué pour le nucléaire, il s'agit dans les deux cas d'étudier un média poreux destiné à bloquer des particules, pour protéger nos poumons dans le cas de la pandémie, empêcher la dispersion d'aérosols radioactifs dans le cas du nucléaire.

COLLECTER LE PLUS D'AÉROSOLS POSSIBLE SANS COLMATER LES FILTRES

À quoi ressemblent les filtres au travers desquels passe l'air qui entre et qui sort des locaux confinés contenant de la matière radioactive susceptible d'être dispersée ? Comme la plupart des filtres à air, ce sont des enchevêtrements de fibres. Dans l'industrie nucléaire, les fibres sont en verre pour des raisons de finesse et de stabilité thermique et chimique. Elles sont organisées en nappes plissées un peu à la manière des filtres à air des moteurs de nos voitures. Ces nappes sont ensuite juxtaposées dans un boîtier métallique de plusieurs dizaines de centimètres de long et de large selon les modèles.

Comment fonctionnent ces médias fibreux ? Avec une aspiration, comme notre hotte de cuisine (dans certains cas, cela peut être un soufflage), >

► dont on régule la vitesse, autrement dit le flux d'air, selon les besoins. Dans un bâtiment, c'est la ventilation qui assure ce rôle. Et dans les locaux confinés des installations nucléaires, tout le réseau de ventilation est conçu et piloté pour que les pièces censées être confinées soient toujours en légère dépression, que l'air puisse y entrer et ne puisse en sortir qu'après avoir été épuré. Ainsi, filtration, ventilation et confinement des locaux sont intimement liés.

Un filtre est caractérisé par deux paramètres: sa capacité à retenir les polluants (son efficacité) et la résistance qu'il oppose à l'écoulement (sa résistance aéralique, qui se traduit physiquement par une «perte de charge» du filtre: plus celle-ci augmente, plus le débit de filtration diminue). Pour assurer le bon fonctionnement du système global, il faut préserver autant que possible la performance des filtres, autrement dit collecter le plus d'aérosols possible sans les colmater. Il faut également anticiper le moment où le filtre doit être changé et intervenir avant qu'il ne soit trop encrassé, comme on le ferait avec un aspirateur domestique.

«En situation normale, les aérosols sont principalement de taille micro-métrique (entre 0,5 µm et 5 µm) et leur concentration dans l'air est faible. Très peu traversent les filtres THE très performants et lorsqu'ils sont

collectés, ils impactent peu la résistance aéralique, explique Soleiman Bourrous. Dans les installations, en fonctionnement normal, les filtres sont périodiquement contrôlés pour s'assurer qu'ils ne fuient pas et que leur niveau de résistance aéralique reste compatible avec les débits d'air assurant une bonne ventilation des locaux. Cependant, le risque de colmatage peut devenir important, notamment en présence d'aérosols comme les particules de suie produites lors d'un incendie, car leur morphologie est particulièrement problématique.» Au début des années 2000, l'IRSN a montré que ces agglomérats composés de petites sphères de carbone de quelques dizaines de nanomètres (typiquement 10 à 60 nm) pouvaient obstruer les filtres très rapidement. Dans le pire des cas, quelques grammes de suie peuvent annihiler les performances du filtre alors qu'il est évidemment impossible, au cours d'un incendie, d'intervenir pour le remplacer ou même mesurer sa dégradation.

Une installation comporte plusieurs modèles de filtres avec différentes formes de plis, surfaces de filtration et structures fibreuses. Par ailleurs, le colmatage n'est pas un phénomène linéaire: pour un type donné de particules, un même filtre peut conserver ses capacités de filtration avec un dépôt épais mais très aéré (très poreux) et les perdre avec un dépôt

moins compact. «Notre but est de comprendre le comportement des aérosols en toute situation pour éviter une défaillance de la filtration et la dispersion de polluants radioactifs. Et c'est bien plus complexe qu'il n'y paraît, fait remarquer le chercheur. Toute la difficulté est de quantifier les phénomènes pour trouver l'optimum de fonctionnement des filtres.»

La conception de la ventilation et de la filtration doit garantir leur efficacité en toute situation, y compris en cas d'incendie, où les filtres THE risquent d'être colmatés par les suies. L'équipe a d'abord identifié les processus en jeu et établi des corrélations empiriques entre les propriétés des particules, les conditions aéraliques et la durée de vie du filtre. De quoi anticiper des défaillances potentielles associées aux scénarios d'incidents déjà identifiés. Pour aller au-delà, il fallait s'attaquer au problème sous un angle plus fondamental, établir des corrélations sur la base des phénomènes physiques en jeu. L'IRSN s'y est attelé depuis plus de quinze ans, notamment dans le cadre de doctorats et postdoctorats. «À travers diverses collaborations scientifiques, nous avons développé un modèle constitué de sous-modèles phénoménologiques basés sur la physique des aérosols et capable de rendre compte des mécanismes de colmatage: interactions entre particules et fibres, impact des écoulements sur la formation de dépôts dans les plis de filtres, etc.», précise Soleiman Bourrous, qui fut un des doctorants sur le sujet.



Soleiman Bourrous (à droite) et un membre de son équipe installent un filtre THE dans un conduit de ventilation lors d'un essai.

en jeu. N'oublions pas que le filtre est un enchevêtrement de fibres. Après avoir été collectées, les particules s'agglomèrent en formant des dépôts plus ou moins compacts entre les fibres et dans les plis du filtre. «À ce stade, on peut seulement influencer la porosité du dépôt, poursuit-il. C'est contre-intuitif, mais les dépôts compacts sont, en général, préférables, car ils couvrent moins de surface de filtration dans le pli.»

La porosité des dépôts dépend avant tout de la taille des particules (les plus petites forment des dépôts plus aérés), mais aussi de leur morphologie (des particules parfaitement sphériques forment des dépôts moins poreux) ainsi que de la vitesse de filtration (plus l'écoulement est lent, plus le dépôt est poreux). Autre point fondamental: la résistance aéralique. Elle est fonction de la surface d'échange des particules, autrement dit de leur surface de frottement avec l'air. Et celle-ci est d'autant plus importante que les particules sont petites. «Pour toutes ces raisons, les particules de suie, du fait de leur taille, engendrent de fortes pertes de charge», conclut Soleiman Bourrous.

MODÉLISER POUR ANTICIPER

Vu la complexité des phénomènes en jeu et leur interdépendance, seule la modélisation permet d'anticiper des situations imprévues et de gérer filtration et ventilation de façon optimale. «Grâce à nos modèles prédictifs, nous sommes capables d'évaluer les performances des filtres et leur durée de vie selon les vitesses de filtration et la variété des aérosols et des filtres présents dans les installations nucléaires», se félicite Soleiman Bourrous. Concrètement, ces modèles décrivent les phénomènes en jeu et leurs interactions aux différentes échelles.

De surcroît, pour pouvoir évaluer à tout moment très rapidement, notamment en cas d'accident, l'efficacité et la résistance aéralique d'un filtre, ces modèles sont basés sur des algorithmes très simples, des lois analytiques et non une simulation numérique complexe. «Ils tournent presque instantanément sur un ordinateur standard», précise le chercheur. Ils sont intégrés dans le logiciel Sylvia, développé par l'IRSN pour représenter la totalité du réseau de ventilation d'une installation nucléaire, avec ses conduites, ses filtres, ses ventilateurs et pour prédire son comportement en cas d'incendie.

«Les études que nous poursuivons pour mieux comprendre la physique de ces phénomènes complexes conduisent à disposer de modèles universels applicables à des secteurs industriels hors nucléaire, agroalimentaire, chimie, pharmacie, purification d'air, etc.; conclut Soleiman Bourrous. Les applications ne manquent pas. Nos recherches devraient également permettre d'ouvrir des pistes pour la synthèse de nouveaux matériaux nanostructurés.»

RÉFÉRENCES

- > Nuvoli, J. (2021). Étude des mécanismes de formation des dépôts de particules appliquée à la filtration THE (Thèse de doctorat, université de Lorraine).
- > Aillou, Y. (2018). Impact sur le colmatage en régimes transitoire et permanent des écoulements d'air induits par le plissage des médias filtrants THE. (Thèse de doctorat, université de Lorraine).
- > Bourrous, S. (2014). Étude du colmatage des filtres THE plans et à petits plis par des agrégats de nanoparticules simulant un aérosol de combustion. (Thèse de doctorat, Université de Lorraine).
- > Mocho, V.M., & Ouf, F.X. (2011). Logging of industrial pleated high efficiency particulate air (HEPA) filters in the event of fire. Nuclear Engineering and design, 241(5), 1785-1794.
- > Ouf, F.-X., (2006). Caractérisation des aérosols émis lors d'un incendie. (Thèse de doctorat, université de Rouen).
- > Mocho V.M., Bouilloux L. Renzi V., (2004) – Facteurs influençant le colmatage des filtres THE industriels par des aérosols formés en cas de feux de différents matériaux – 20^{ème} Congrès Français sur les Aérosols, décembre 2004, Paris.

QUELS PHÉNOMÈNES À QUELLE ÉCHELLE ?

Des particules entraînées dans un flux d'air au travers d'un filtre à une vitesse d'écoulement de 2,5 cm/s sont susceptibles d'avoir trois comportements caractéristiques à l'échelle des fibres: les particules les plus fines (<0,1 micromètre, ou µm) 1 ont un mouvement erratique de diffusion et finissent par être arrêtées; celles entre 0,1 et 0,3 µm 2 sont les plus difficiles à collecter, car elles suivent parfaitement les lignes de courant et ne sont interceptées que si elles frôlent la fibre; les plus grosses (>0,3µm) 3 impactent les fibres, parce qu'elles ont tendance à «aller tout droit» du fait de leur inertie. Tous ces mécanismes conditionnent l'efficacité de collecte de chaque fibre 4. En traversant l'épaisseur du filtre, les particules rencontrent plusieurs fibres et l'efficacité globale du filtre atteint presque 100%, quelle que soit la taille des particules 5. Celles-ci s'agglomèrent et forment un dépôt 6; ainsi, elles remplissent les plis du filtre de façon plus ou moins aérée, les petites particules formant des dépôts moins compacts 7 que les grosses 8. Chacun de ces mécanismes de collecte (diffusion, impaction, interception) intervient avec plus ou moins d'efficacité selon la vitesse de filtration 9. Il existe plusieurs modèles de filtres, la surface de filtration totale d'une cellule complète pouvant aller jusqu'à 34 m² 10. Selon les besoins, plusieurs cellules sont juxtaposées.

