

FILTRATION DES AÉROSOLS - PERFORMANCES DES MÉDIAS FILTRANTS

- Filtre
- Fibre
- Efficacité
- Aérosol
- Dépoussiéreur

► Denis BÉMER, Roland RÉGNIER,
INRS, Département Ingénierie des procédés
► Sandrine CALLÉ, Dominique THOMAS,
Xavier SIMON, Jean-Christophe APPERT-COLLIN,
CNRS/LSGC

Le Laboratoire de Filtration des Aérosols de Nancy (LFA) créé en 2000, associant une équipe de l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) à une équipe du LSGC (Laboratoire des Sciences du Génie Chimique - CNRS), a pour objectif d'apporter une expertise dans le domaine de la filtration des aérosols aux spécialistes des CRAM (Caisses Régionales d'Assurance Maladie) et aux industriels. Après un point théorique sur la filtration par les médias fibreux, cet article fait une synthèse des différentes actions menées par le LFA, notamment : performances des filtres au cours du colmatage par des aérosols liquides et solides, modélisation, optimisation du décolmatage pneumatique des dépoussiéreurs à manches, influence des micro fuites.

AEROSOL FILTRATION – PERFORMANCE OF FILTER MEDIA

Set up in 2000, the Laboratoire de Filtration des Aérosols in Nancy (LFA), associating research teams from INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) and LSGC (Laboratoire des Sciences du Génie Chimique - CNRS), has been commissioned to provide expertise in the aerosol filtration field to both CRAM (Caisse Régionale de l'Assurance Maladie) prevention specialists and industrialists. Following a theoretical review of fibre medium filtration, this paper summarises the different actions undertaken by the LFA: filter performance during clogging with liquid and solid aerosols, modelling, pneumatic unclogging of baghouse dust collectors, influence of micro-leaks, etc.

- Filter
- Fibre
- Efficiency
- Aerosol
- Dust collector

La nécessité d'un air exempt de particules existe pour un très grand nombre de procédés industriels et, pour certains, une qualité d'air exceptionnelle est même requise. Pour les personnes travaillant dans l'industrie, le secteur tertiaire et l'agriculture, le contrôle des expositions aux aérosols est également un impératif, compte tenu de la dangerosité de nombreuses particules pour la santé. La filtration de l'air s'impose par conséquent à différents niveaux afin de protéger les opérateurs vis-à-vis des polluants de nature particulière. Pour cela, de nombreux systèmes existent. La filtration au moyen de médias fibreux est la technique la plus répandue du fait de ses performances, de son faible coût et de sa facilité d'adaptation aux diverses situations susceptibles d'être rencontrées.

Ce constat a conduit, en 2000, l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) et le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) à mettre en commun les moyens et le personnel de deux équipes travaillant sur la

filtration des aérosols. C'est ainsi que fut créé le Laboratoire de Filtration des Aérosols de Nancy (LFA). Ce laboratoire, commun aux deux entités, a pour objectif d'apporter une expertise dans le domaine de la filtration des aérosols aux spécialistes des CRAM (Caisses Régionales d'Assurance Maladie) et aux industriels. Le regroupement des compétences des deux laboratoires a été très profitable par son action dynamisante sur les études, en permettant de dégager du temps pour des travaux à caractère plus fondamental, notamment sur les mécanismes de colmatage et leur modélisation, et en facilitant la valorisation des résultats par de nombreuses communications et publications.

Afin de répondre aux interrogations de ces différents acteurs de la prévention, diverses études sur la filtration par les filtres à fibres ont été conduites dans le cadre du LFA. Nous allons rappeler quelques points sur la filtration des aérosols avant de présenter les principaux résultats tirés des différentes études.

PROPRIÉTÉS DES FILTRES À FIBRES - QUELQUES NOTIONS THÉORIQUES

Un aérosol est défini comme la suspension de particules solides ou liquides dans un milieu gazeux présentant une vitesse de chute négligeable. Dans l'air et dans les conditions normales, cela correspond à des particules de tailles inférieures à 100 µm.

Un filtre à fibres est constitué par un assemblage de fibres métalliques, naturelles ou synthétiques. Pour leur conférer des propriétés intéressantes, ces médias filtrants peuvent subir un traitement thermique ou mécanique. Un filtre est caractérisé par sa compacité (volume des fibres/volume du filtre), son grammage (masse du filtre/surface du filtre), son épaisseur, la distribution granulométrique des fibres ou le diamètre moyen des fibres.

À l'état neuf, un filtre à fibres est caractérisé par sa perte de charge et par son efficacité, dite initiale. Si le débit d'air amont est égal au débit aval, l'efficacité (E) est donnée par le ratio de la concentration aval sur la concentration amont :

$$E = 1 - \frac{C_{aval}}{C_{amont}}$$

On parle d'efficacité totale massique ou en nombre selon que les concentrations sont exprimées en masse ou en nombre. L'efficacité définie pour un diamètre de particule est indépendante de l'unité de la concentration ; elle est souvent appelée efficacité fractionnelle.

Un « bon filtre » doit présenter une perte de charge (ΔP) faible afin de minimiser la dépense énergétique et une efficacité (E) élevée. Cette caractéristique est mesurée par le facteur de qualité $\{-\ln(1-E)\}/\Delta P$ qui doit être le plus élevé possible.

L'efficacité initiale est déterminée expérimentalement. Cependant, il est possible, sous certaines conditions de la calculer. Ainsi, pour un filtre homogène dans sa structure et sa composition, l'efficacité d'un filtre à fibres est déterminée par :

$$E = 1 - \exp\left(-4\eta \frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{Z}{\pi df}\right)$$

avec :
 η : efficacité totale de collection d'une fibre,
 α : compacité du filtre,
 Z : épaisseur du filtre,
 df : diamètre des fibres (supposées toutes du même diamètre).

Pour des filtres très efficaces, il est d'usage de parler de perméance P ($P = 1-E$). L'erreur la plus répandue consiste à supposer que seul un effet tamis est responsable de la capture des aérosols par un milieu fibreux. En réalité, l'efficacité unitaire de collection d'une fibre est fonction de plusieurs mécanismes physiques. En l'absence de tout champ de force extérieure autre que le champ de gravité, les plus importants sont :

■ la diffusion brownienne : ce type de capture est significatif pour des particules de faible diamètre ($dp < 0,1 \mu m$). Sous l'agitation brownienne, elles peuvent venir au contact des fibres et y adhérer (cf. Figure 1) ;

■ l'interception directe : ce mécanisme de capture concerne les particules de taille supérieure à $0,1 \mu m$. Une particule de diamètre dp suivant une ligne de courant est interceptée par une fibre lorsqu'elle s'approche de celle-ci à une distance inférieure à son rayon (cf. Figure 2) ;

■ l'impaction inertielle : ce type de capture ne concerne que les grosses particules ($dp > 1 \mu m$). En raison de son inertie, une particule peut ne pas suivre la ligne de courant contournant la fibre et vient s'impacter à la surface de cette dernière (cf. Figure 2) ;

■ l'effet électrostatique : les forces électrostatiques peuvent jouer un rôle en filtration en modifiant les trajectoires des particules, en altérant les phénomènes d'adhérence et de rebond ou en agissant sur le phénomène de colmatage. Le résultat de l'action des forces électrostatiques est qu'une particule passant au voisinage de la fibre est déviée de sa trajectoire et peut venir s'y fixer.

FIGURE 1

Collection des particules par diffusion Particle collection by diffusion

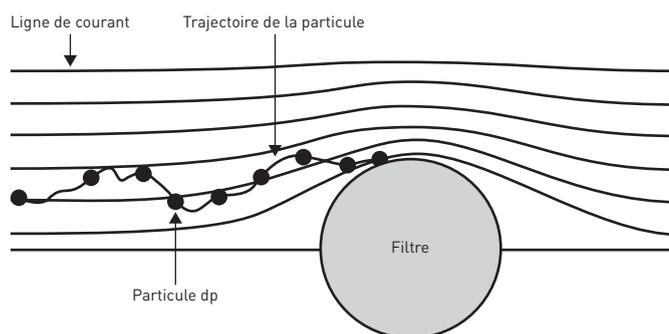


FIGURE 2

Collection des particules par impaction et interception Particle collection by impaction and interception

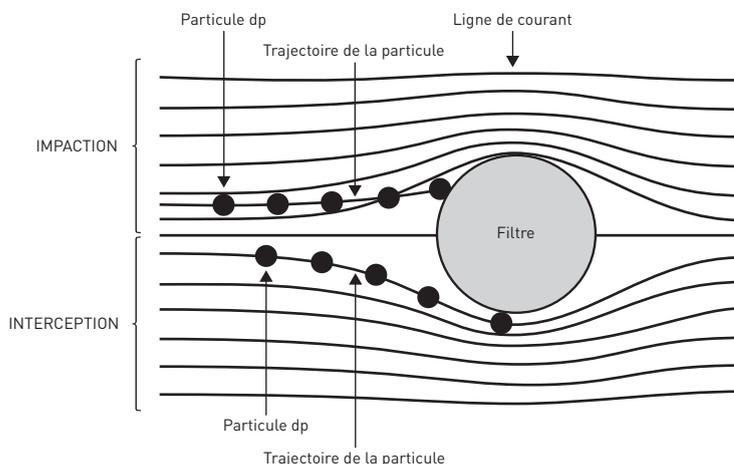


TABLEAU I

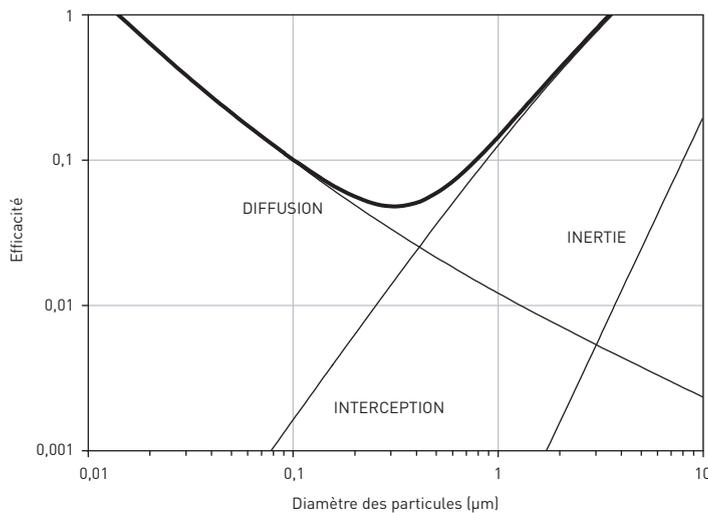
Influence de divers paramètres intrinsèques à l'aérosol, au filtre et à la filtration sur l'efficacité totale d'un filtre à fibres pour les principaux mécanismes de collection

Influence of various parameters intrinsic to aerosol, filter and filtration on total fibre filter efficiency for main collection mechanisms

Efficacité de collection par	Aérosol		Conditions opératoires	Caractéristiques du filtre		
	$\rho_p \nearrow$	$d_p \nearrow$	$U_f \nearrow$	$df \nearrow$	$\alpha \nearrow$	$Z \nearrow$
Diffusion brownienne	\searrow	\searrow	\searrow	\searrow	\nearrow	\nearrow
Interception directe	-	\nearrow	-	\searrow	\nearrow	\nearrow
Impaction inertielle	\nearrow	\nearrow	\nearrow	\searrow	\nearrow	\nearrow

FIGURE 3

Variation de l'efficacité de capture des aérosols en fonction de leur diamètre
Variation of aerosol collection efficiency according to particle diameter



Il a été mis en évidence que le rendement de capture est augmenté lorsque les charges portées sont fortes et les vitesses du gaz faibles. Les filtres de type « électrets » exploitent cette propriété en permettant d'obtenir des efficacités élevées avec une perte de charge faible.

L'efficacité totale de collection est la résultante des trois mécanismes essentiels de capture des particules (inertie, interception, diffusion). On recense dans la littérature de nombreuses expressions tant empiriques que théoriques des efficacités unitaires de collection d'une fibre. Diverses corrélations entre l'efficacité totale et les efficacités unitaires, tenant compte de la compétition entre les trois modes de capture, ont été proposées par de nombreux auteurs. Aucune de ces relations ne donne un bon accord avec l'ensemble des efficacités déterminées expérimentalement. L'explication est à rechercher dans le fait

qu'elles sont toutes fondées sur des modèles d'écoulement autour d'un arrangement idéalisé de fibres ce qui est loin de traduire la réalité. À l'heure actuelle, ces modèles nécessitent une confrontation et un ajustement avec l'expérience afin de tenir compte de la complexité structurale du filtre et des caractéristiques de l'aérosol. Néanmoins, ils permettent de dégager des tendances (cf. *Tableau I*) sur l'influence relative des caractéristiques du média filtrant (diamètre moyen des fibres df , compacité du filtre α et épaisseur du filtre Z), de l'aérosol (masse volumique ρ_p et diamètre d_p des particules), des conditions opératoires (vitesse de filtration U_f) sur l'efficacité, liées aux principaux mécanismes de collection.

La *Figure 3* illustre l'influence de la taille des particules sur les trois mécanismes décrits précédemment et sur l'efficacité initiale du filtre.

Pour des tailles de particules comprises entre 0,1 et 0,5 μm , l'efficacité est minimale. Ce domaine correspond à des particules trop grosses pour que l'effet de diffusion soit efficace et trop petites pour que les mécanismes d'interception et d'impaction jouent un rôle important. Cette taille de particule est appelée taille de la particule la plus pénétrante soit, en anglais, Most Penetrating Particle Size (MPPS). Il s'agit en fait des particules les plus difficiles à capturer. C'est dans ce domaine de dimension particulaire qu'est déterminée l'efficacité des filtres à Très Haute Efficacité (THE). En effet, elle est mesurée dans les conditions les plus pénalisantes. De même, il existe une vitesse du gaz pour laquelle l'efficacité est minimale. Cette vitesse est de l'ordre de 20 à 40 cm.s^{-1} . La MPPS d'un filtre chargé électriquement est déplacée vers 50-60 nm, pour des particules neutres (au lieu de 300 nm)

L'évolution de l'efficacité dans le domaine correspondant à la transition gaz-particule (< 10 – 20 nm) est incertaine et fait l'objet de recherches. Des résultats récents montrent néanmoins que l'efficacité augmente pour une diminution du diamètre de particule jusque 2,5 nm.

En dehors de ces paramètres (vitesse du gaz, taille des particules, diamètres des fibres, densité des fibres), l'efficacité fractionnelle dépend :

- des propriétés d'adhésion filtre-particules ;
- de la température et de la pression du gaz traité ;
- de l'état de colmatage de la couche filtrante.

Il ressort du *Tableau I* qu'un accroissement de l'épaisseur, un accroissement de la compacité du filtre ou une diminution du diamètre des fibres impliquent une augmentation de l'efficacité, au détriment toutefois d'une perte de charge plus élevée.

Pour les filtres utilisés en ventilation générale et les préfiltres, l'accroissement de la vitesse entraîne généralement une augmentation du rendement pour les tailles de particules supérieures à quelques micromètres. Pour des tailles supérieures à 10 μm , il arrive que le rendement, après avoir augmenté, baisse à partir d'une certaine vitesse. La plupart du temps, cela est dû au fait que les particules sont animées d'une vitesse suffisamment forte pour que les chocs

sur les fibres se fassent avec rebond. Il se peut également, surtout lorsque le filtre est colmaté, que des particules migrent à travers la couche poreuse et finissent par être réentraînées lorsqu'elles arrivent au voisinage de la face de sortie.

ÉVOLUTION DES PERFORMANCES DU FILTRE AU COURS DU COLMATAGE

Si le filtre à fibres peut être considéré comme homogène à l'état neuf, son colmatage va induire de profondes modifications en son sein ou à sa surface le rendant de fait inhomogène dans sa composition et dans son épaisseur.

La filtration d'un **aérosol solide** sur filtre plan, induit une augmentation de la perte de charge et de l'efficacité au cours du temps (cf. *Figure 4*). Cette évolution temporelle se caractérise par trois phases distinctes :

- une phase où les particules sont collectées au sein du filtre (filtration en profondeur) ;
- une phase de transition au cours de laquelle un dépôt de particules commence à apparaître sur la surface du filtre (co-existence des filtrations en profondeur et en surface) ;
- une phase conditionnée uniquement par la filtration en surface. Le dépôt formé est suffisamment important pour capter les particules en son sein et jouer ainsi le rôle de filtre.

Par ailleurs, pour une même masse de particules collectées, la perte de charge du filtre sera plus importante pour des particules submicroniques. En effet à ces dimensions, les particules collectées forment des dendrites offrant une surface à l'écoulement plus importante (cf. *Figure 5*). Dans le cas de particules microniques (cf. *Figure 6*), le dépôt se présente sous forme d'agrégats.

Dans le cas des filtres dont les fibres sont chargées électriquement (filtres « électrets »), l'évolution de l'efficacité avec le colmatage est complexe et présente généralement une phase de décroissance de l'efficacité en début de colmatage, à la différence des filtres sans effet électrostatique.

FIGURE 4

Évolution de la perte de charge et de l'efficacité au cours du colmatage d'un filtre à fibres par un aérosol solide micronique
Pressure drop and efficiency variation during fibre filter clogging by a micronic solid aerosol

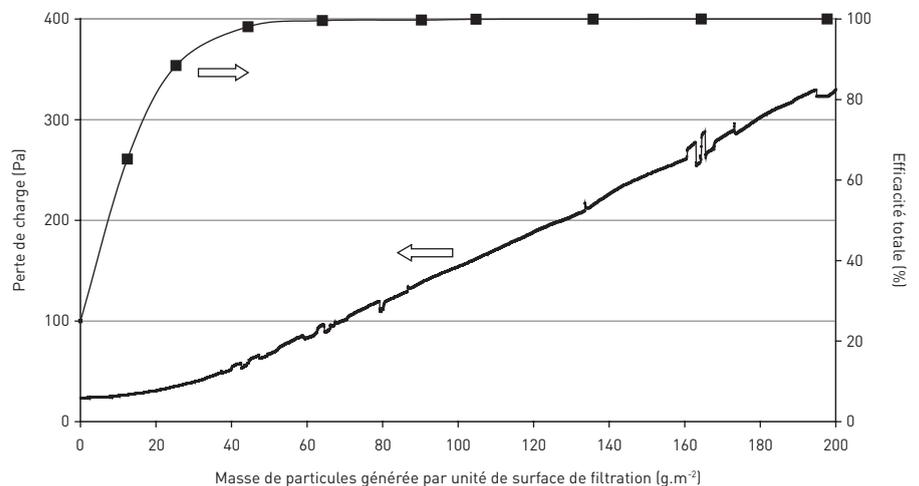
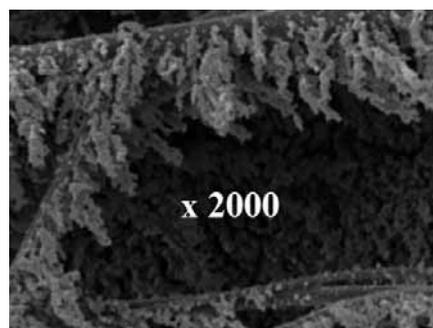


FIGURE 5

Dendrites constituées de particules de 0,15 mm de diamètre
Dendrites made up of 0.15 mm diameter particles



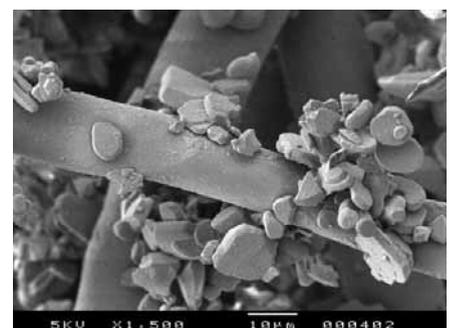
Dans le cas de la filtration d'un **aérosol liquide** non volatil sur filtre plan, les courbes de perte de charge et perméance obtenues ont des allures complètement différentes de celles obtenues pour la filtration d'aérosols solides.

Pour un filtre THE colmaté par un aérosol liquide mouillant les fibres, cette évolution se caractérise par quatre phases (cf. *Figure 7*) :

- une première phase où les gouttelettes collectées se déposent sous forme de perles sur les fibres avec augmentation de la perte de charge et de la perméance (cf. *Figure 8*) ;
- une seconde phase où les gouttes coalescent sur les fibres ;
- une troisième phase où des ponts liquides voire un film se forment aux interstices des fibres du filtre

FIGURE 6

Agrégats sur des fibres de particules d'alumine de diamètre moyen de 2,6 mm
Aggregates on alumina particle fibres with a mean diameter of 2.6 mm



(cf. *Figure 9*). On a ainsi une augmentation exponentielle de la perte de charge avec une diminution de la perméance due au phénomène d'impaction ;

- enfin, une quatrième phase où l'on a collection du liquide et drainage en pieds de filtre. On aboutit alors à un état pseudo stationnaire pour la perte de charge et la perméance.

On observe donc une baisse d'efficacité au cours du temps.

Ceci n'est pas le cas pour un filtre moyenne efficacité pour lequel la perméance part d'une valeur élevée pour ensuite décroître brutalement. Ces deux comportements opposés montrent que la seule connaissance de l'efficacité initiale ne permet pas de prévoir l'efficacité lors du colmatage.

FIGURE 7

Évolution de la perte de charge et de la perméance d'un filtre THE pendant le colmatage par un aérosol liquide (DEHS ; Di-Ethyl-Hexyl-Sébacate)
 Pressure drop and penetration of a VHP filter during liquid aerosol clogging
 (DEHS: Di-Ethyl-Hexyl-Sebacate)

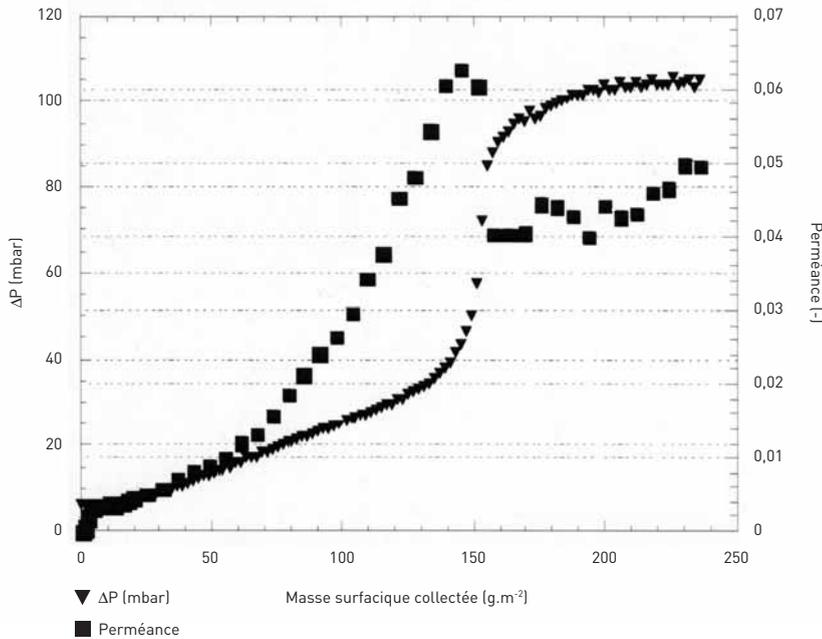
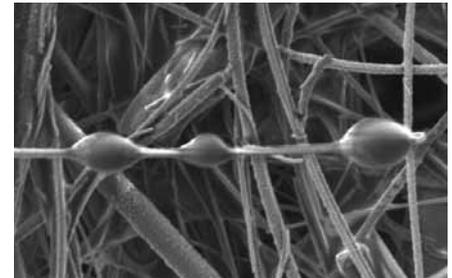


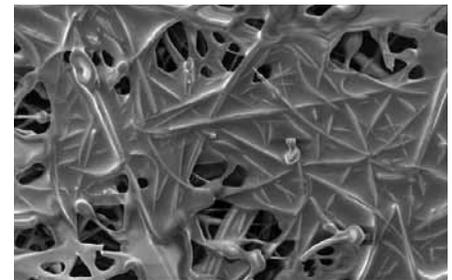
FIGURE 8

Vues au microscope électronique à balayage des phases de colmatage d'un filtre à fibres THE pour un aérosol liquide
 Scanning electron microscope views of clogging phases in a HEPA fibre filter for a liquid aerosol

Scanning electron microscope views of clogging phases in a HEPA fibre filter for a liquid aerosol



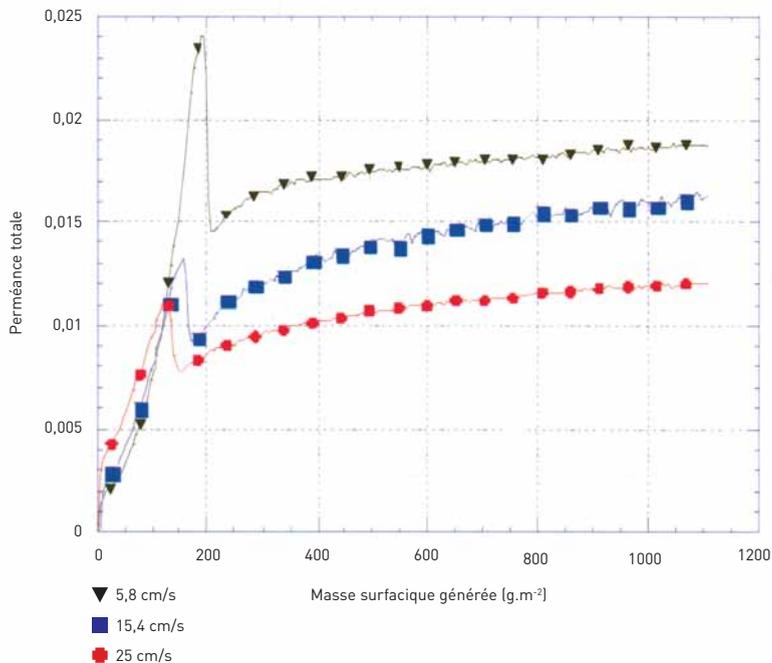
Phase 1



Phase 2

FIGURE 9

Perméance en fonction de la vitesse de filtration pour un filtre à très haute efficacité (D309)
 Penetration with respect to filtration velocity for a VHP filter (D309)



d'un filtre THE en fonction de la masse surfacique de gouttelettes de liquide générées pour trois vitesses de filtration différentes.

Industriellement, la filtration peut se faire de façon discontinue. L'interruption de la génération, et donc de la filtration, pendant la phase de colmatage n'a aucune influence sur la perte de charge tant que le palier de drainage n'est pas atteint. Par contre, sur ce palier de drainage, une perméation à l'air à une vitesse différente de la vitesse de filtration conduit à des reprises de perte de charge différentes de celle d'origine (supérieure ou inférieure) suivant la vitesse de perméation) (cf. figure 10). Ceci peut être dû à un nouvel équilibre des forces capillaires ou à une modification de la structure du filtre. Ce point peut être important dans les cycles de filtration industrielle.

L'aspect modélisation de la perte de charge et de la perméance est en cours. Dans un premier temps, cette modélisation est phénoménologique mais devrait permettre de donner des tendances sur l'évolution de ces deux grandeurs.

Néanmoins, pour les deux types de filtres, l'évolution de la perméance avec la vitesse de filtration est la même : pour des particules liquides submicroniques,

elle diminue avec la vitesse de filtration. Il est donc préférable de filtrer à haute vitesse. À titre d'illustration, la Figure 9 présente l'évolution de la perméance

L'étude de la filtration de **mélange d'aérosols solide et liquide** s'inscrit logiquement à la suite des études de la filtration d'aérosols solide et liquide seuls. Actuellement très peu d'études et de publications existent sur ce sujet. Ceci est d'autant plus dommageable que ce cas est fréquemment rencontré industriellement. L'expérimentation a donc consisté à suivre l'évolution de la perte de charge et de la perméance lors de la filtration de mélange d'aérosols liquide (DEHS) et solide (Alumine) en balayant le pourcentage massique de solide dans le mélange de 0 (liquide seul) à 100 % (solide seul).

On constate une évolution de la perte de charge supérieure à celle du liquide ou du solide seuls avec cinq étapes (cf. Figure 11) : une faible augmentation au départ, une forte croissance, un pseudo-palier où la perte de charge croît légèrement, une seconde croissance puis un second palier où un drainage de liquide est observé. Ce dernier palier est cependant beaucoup plus élevé que celui du liquide seul. Une représentation en fonction de la masse générée (comme pour les aérosols seuls) est difficile à établir car les deux phases ont des masses volumiques différentes.

Au microscope électronique à balayage (MEB), on observe que les particules se déposent d'abord autour des fibres par agrégats. Puis, les interstices se comblerent et le dépôt se forme en surface. Cependant, chaque phase est plus difficile à interpréter que pour le liquide ou le solide seul.

En ce qui concerne la perméance, elle a été mesurée sur un filtre moyenne efficacité uniquement et on observe des valeurs comparables à celles du liquide seuls.

Cette étude sur les mélanges n'est qu'introductive et demande à être poursuivie afin de mieux comprendre les différents mécanismes mis en jeu. Cette analyse est d'autant plus importante que la présence de tels mélanges d'aérosols est très souvent observée dans l'industrie.

INCIDENCE DES FUITES SUR LES PERFORMANCES DES FILTRES À FIBRES – AÉROSOL SOLIDE

En milieu industriel, la détection de fuites sur des installations de filtration de l'air se fait essentiellement par le suivi de

FIGURE 10

Influence de la vitesse de perméation pendant la phase de repos sur la perte de charge résultante, vitesse de filtration $5,8 \text{ cm.s}^{-1}$
 Influence of rest-phase permeation velocity on resulting pressure drop, filtration velocity $5,8 \text{ cm.s}^{-1}$

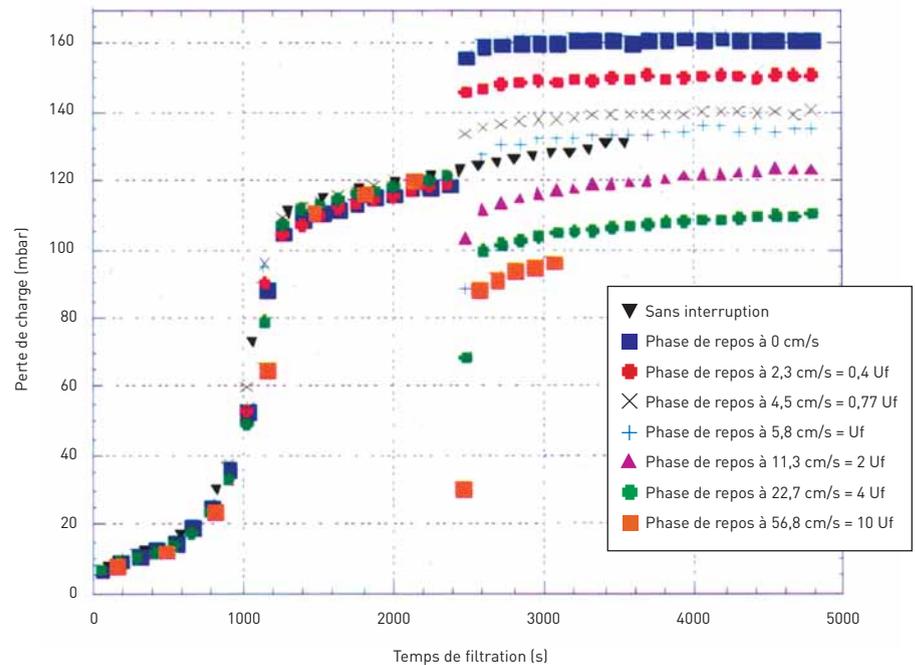


FIGURE 11

Comparaison des différents pourcentages étudiés en fonction du temps (filtre haute efficacité)
 Comparison of different studied percentages with respect to time (HP filter)

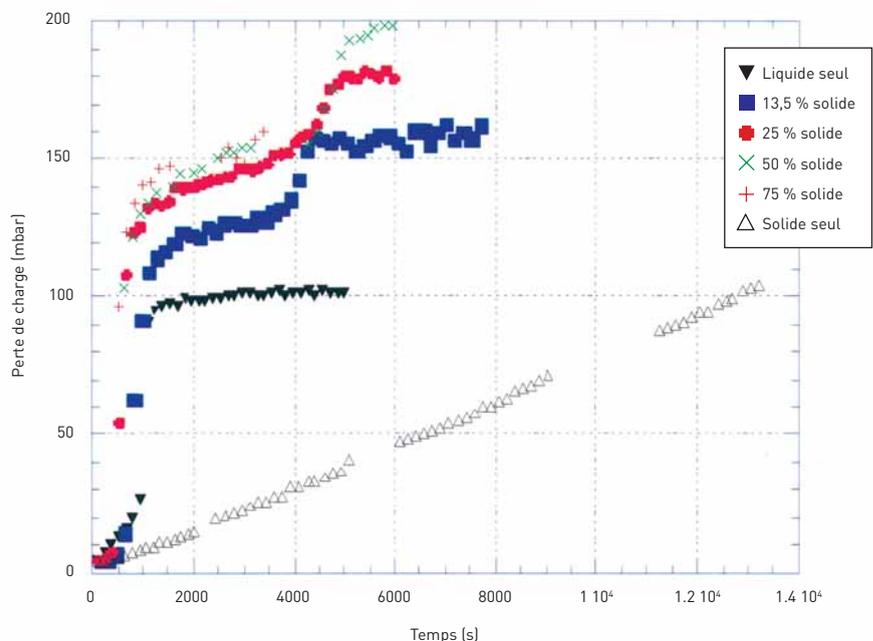
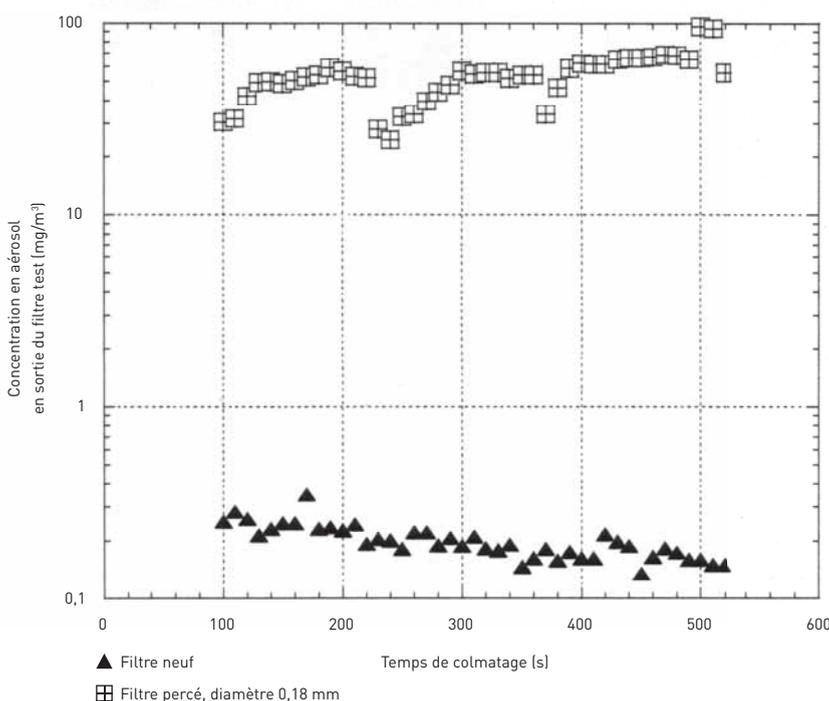


TABLEAU II

Résultats des mesures sur le filtre THE (D309)
Results of VHP filter (D309) measurements

Diamètre du perçement	Détection ΔP	
	Filtre percé	Filtre de sécurité
$\varnothing > 0,57$ mm	oui	oui
$\varnothing \leq 0,57$ mm	non	$\varnothing \leq 0,18$ mm non $\varnothing > 0,18$ mm oui

FIGURE 12

Évolution de la concentration en sortie du filtre test percé d'un trou de 0,18 mm de diamètre en comparaison avec celle mesurée en sortie d'un filtre neuf
Variation of outlet concentration for test filter pierced with a 0.18 mm diameter hole compared with concentration measured at a new filter outlet


la perte de charge du système de filtration. Si cette approche semble efficace afin d'identifier de franches déchirures du média, la question était de connaître les limites de ce système de détection.

Nous avons étudié les performances d'un média filtrant en fibres de verre de Très Haute Efficacité (THE) lors de son colmatage par un aérosol solide, présentant des perforations de différentes tailles. Un deuxième étage de filtration constitué d'un filtre THE, appelé filtre de sécurité, a été placé en aval du filtre test pour une éventuelle détection des fuites.

La première conclusion est que pour de faibles percements ($\varnothing \leq 0,57$ mm),

l'évolution de la perte de charge du filtre test ne présente aucune différence avec celle du filtre neuf et ne permet donc pas la détection de la fuite. Par contre, pour de plus grandes tailles (5,6 mm, par exemple), l'effet de la fuite apparaît clairement sur la courbe de suivi de la perte de charge qui se trouve bien en dessous de celle du filtre neuf.

La deuxième conclusion porte sur l'utilisation d'un filtre de sécurité pour la détection de ces percements de faible taille. Il apparaît en effet que cette méthode est efficace puisque l'on observe un colmatage du filtre de sécurité placé en aval du filtre test percé de trous de faible diamètre (0,57 mm, par exemple).

Par contre, dans le cas de plus faibles tailles de perçement (0,18 mm, par exemple), aucune détection de fuites n'apparaît, ni par le suivi de la perte de charge du filtre test, ni par le suivi de celle du filtre de sécurité. Les résultats sont résumés dans le *Tableau II*.

La question est alors de savoir si ce perçement non détecté entraîne une modification de l'efficacité de séparation du filtre. Des mesures de la concentration de l'aérosol non collecté ont donc été réalisées. Les résultats sont présentés sur la *Figure 12*.

Ces mesures montrent que la concentration en aval du filtre test percé d'un trou de très faible diamètre est largement supérieure à celle mesurée en aval du filtre test neuf.

Cette étude permet donc de critiquer fortement la méthode, couramment employée, de détection de fuites dans les médias filtrants reposant sur le seul suivi de la perte de charge du système de filtration.

RÉGÉNÉRATION DES MÉDIAS FILTRANTS

En se déposant par couche sur les éléments filtrants lors du colmatage, les poussières forment un filtre supplémentaire, appelé gâteau de particules, qui vient augmenter l'efficacité de filtration du système mais également de la perte de charge. Il est alors nécessaire de décolmater périodiquement les éléments filtrants afin de détacher la couche de particules.

Le décolmatage peut s'effectuer par l'une des techniques suivantes :

- décolmatage sonore (émetteurs de sons hautes fréquences – haute intensité) ;
- décolmatage par secouage des éléments filtrants (vibrations mécaniques) ;
- décolmatage à contre-courant (injection d'un grand volume d'air à contre-courant sous faible pression) ;
- décolmatage pneumatique (injection d'un petit volume d'air à contre-courant sous haute pression).

Cependant, le décolmatage sonore ne conduit pas à des performances

satisfaisantes et le décolmatage par secouage est aujourd'hui pratiquement abandonné. Le décolmatage à contre-courant s'effectue « off-line », c'est-à-dire avec arrêt du débit d'air à traiter. Il favorise la décantation des poussières les plus fines et les plus légères vers la trémie, mais détruit momentanément la capacité de filtration de la couche filtrante car cette dernière est éliminée en trop grande partie.

Le décolmatage pneumatique s'effectue « on-line » (sans arrêt du débit d'air à traiter). S'il est correctement maîtrisé, il préserve au mieux la capacité de filtration du dépoussiéreur puis que le gâteau n'est jamais complètement détruit, mais les poussières sont susceptibles de se redéposer sur la manche ou sur les manches voisines. Le jet d'air comprimé envoyé à l'intérieur de la manche provoque une déformation brutale du média et un flux d'air à contre-courant qui conduisent au détachement du gâteau de particules.

Cette dernière technique est la plus fréquemment rencontrée dans le milieu industriel. Le choix a donc été fait d'équiper les bancs d'essais d'un système de décolmatage pneumatique à contre-courant.

ÉTUDE DE COMPARAISON ENTRE MÉDIAS PLANS ET UN DÉPOUSSIÉREUR INDUSTRIEL

Le laboratoire possède un banc d'essais permettant de suivre l'évolution des performances d'un média filtrant plan soumis à un fonctionnement cyclique de colmatage et de décolmatage.

Les résultats sur médias plans ont été comparés à ceux obtenus avec un dépoussiéreur dont les éléments filtrants sont constitués des mêmes médias afin de déterminer dans quelle mesure l'étude sur médias plans pouvait rendre compte des performances d'un dépoussiéreur industriel et d'en définir les limites.

Deux médias, constitués chacun d'un feutre de fibres de polyester non tissées et différant par la nature de la surface filtrante (calandrage thermique et membrane en PTFE), ont été étudiés. L'étude a montré que les performances établies sur média plan étaient en bon accord avec celles mesurées sur le dépoussiéreur industriel (cf. Figures 13 et 14) avec, néanmoins, une baisse de l'efficacité lors du décolmatage plus

marquée sur dépoussiéreur que sur média plan.

En effet, les effets complexes d'une injection d'air comprimé à contre-courant dans une poche filtrante de taille réelle ne peuvent pas être reproduits à l'identique sur une surface aussi petite que celle d'un média plan ; il en va de même des interactions entre les poches lors du décolmatage.

Principales conclusions :

■ Cette étude a montré qu'à partir des mesures effectuées sur média plan et en s'appuyant sur des modèles théoriques de filtration, il est possible de reconstruire les variations cycliques de l'efficacité et la perte de charge d'une installation de dépoussiérage industrielle, pour une poussière et des conditions opératoires données.

■ Elle a également permis de mettre en évidence la nette amélioration de l'efficacité dans le domaine submicro-nique apportée par la membrane polymère en PTFE, par rapport au simple traitement par calandrage thermique (l'évolution à long terme des performances de cette membrane n'a pas été étudiée).

■ L'étude a permis d'accéder à une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu lors des phases de colmatage et de décolmatage et de préciser l'influence d'un certain nombre de paramètres tels que la perte de charge maximale avant décolmatage, la vitesse de filtration, la granulométrie de la poussière, etc.

■ Une méthode de mesure sur site, par comptage optique, de l'efficacité de filtration d'un dépoussiéreur a été mise au point.

ÉTUDE ET OPTIMISATION DU DÉCOLMATAGE PNEUMATIQUE

Les limites des extrapolations réalisées à partir des travaux sur médias plans, ainsi que l'absence de flexibilité expérimentale du dépoussiéreur (modèle commercial aux caractéristiques figées) ont conduit le LFA à se doter d'une installation de dépoussiérage pilote. Les caractéristiques de ce dépoussiéreur à manches sont en rapport avec les modèles courants et permettent de plus, de disposer d'un

grand nombre de fonctionnalités modifiables, tant au niveau du décolmatage que des paramètres de filtration. Cette flexibilité a été mise à profit pour une étude approfondie de la phase de décolmatage.

Suivi du débit traversant chacune des manches au cours des cycles de colmatage et de décolmatage

Le mode de répartition de la poussière sur l'ensemble des manches était un élément méconnu du fonctionnement des dépoussiéreurs. Sa détermination devrait permettre de développer ultérieurement un système optimisé de « décolmatage intelligent » qui agira sur la pression de décolmatage, la séquence et le moment du décolmatage en fonction du degré de colmatage de chacune des manches.

L'évolution des débits de chaque manche au cours de l'avancement dans les cycles de colmatage/décolmatage a été enregistrée. Une cartographie évolutive des débits dans les manches du dépoussiéreur a pu ainsi être établie. On obtient alors de manière indirecte, une représentation de la répartition des particules collectées sur chacune des manches. En effet, une manche plus fortement colmatée présente une résistance aérodynamique plus élevée et par conséquent se voit traversée par un débit d'air plus faible.

Les résultats montrent que la répartition du débit s'effectue de manière homogène dans l'ensemble des 24 manches. En effet, les cycles ne sont qu'une succession de décolmatages qui provoquent des déséquilibres dans la répartition des débits et de colmatages pendant lesquels des compensations s'opèrent au gré des flux d'air empoussiéré qui empruntent les chemins offrant le moins de résistance aérodynamique.

Cependant, des dysfonctionnements (redéposition des poussières sur les manches décolmatées en premier et essoufflement de l'intensité de décolmatage du fait d'un volume de réservoir de l'air comprimé trop faible) semblent être à l'origine de perturbations grandissantes dans la répartition des débits d'air au fur et à mesure des cycles. L'étude de ce phénomène sur un plus grand nombre de cycles, ainsi que la réalisation d'une série de cycles mettant en œuvre des poussières de bois, sont prévues.

FIGURE 13a

Média plan – calandrage thermique
Flat medium – thermobonding fibers

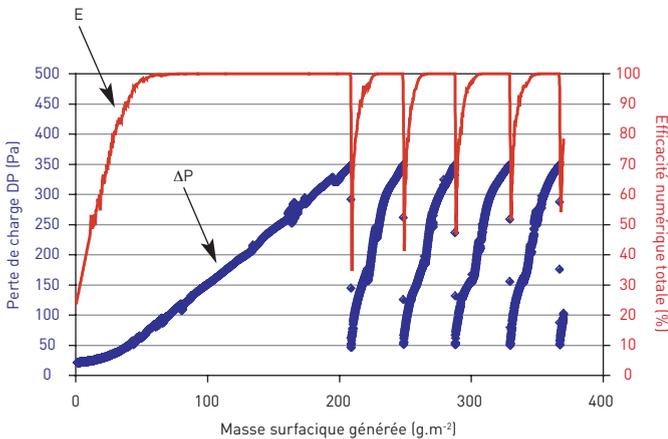


FIGURE 13b

Dépoussiéreur - calandrage thermique
Dust collector – thermobonding fibers

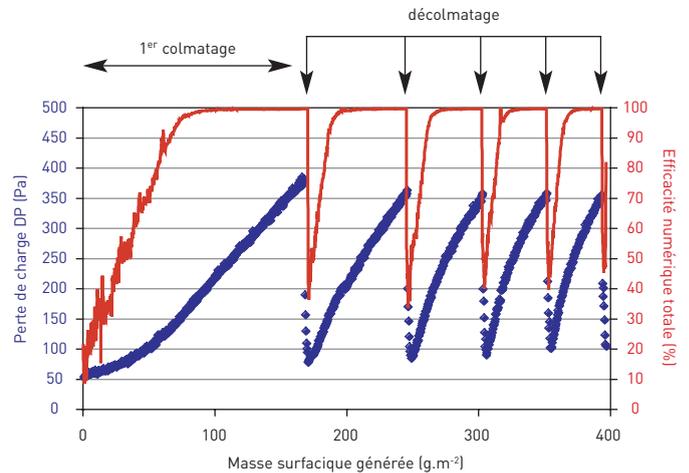


FIGURE 14a

Média plan – membrane PTFE
Flat medium – PTFE membrane

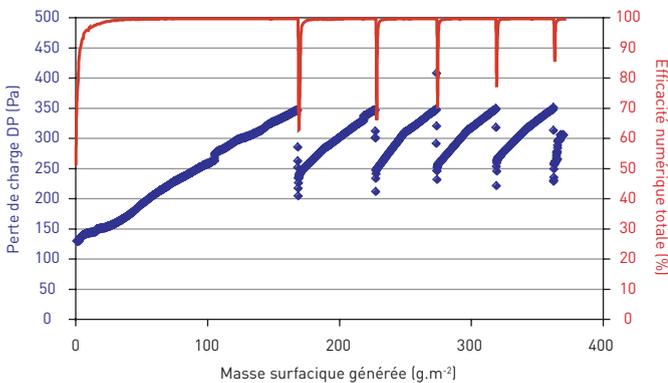
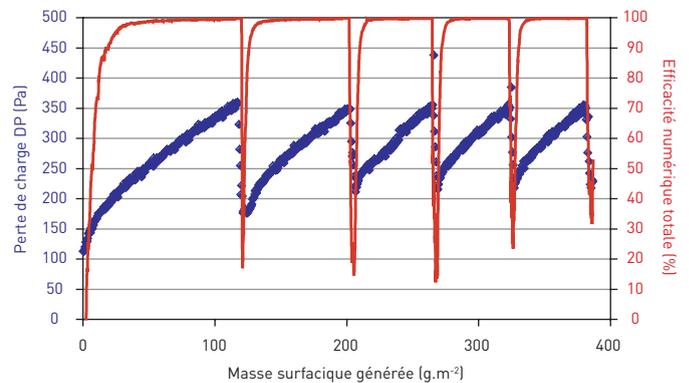


FIGURE 14b

Dépoussiéreur - membrane PTFE
Dust collector – PTFE membrane



Performances d'une manche filtrante en phase de décolmatage

L'optimisation de la technique de décolmatage par à-coup de pression d'air comprimé à contre-courant passe nécessairement par la compréhension des effets produits sur une manche par le jet d'air comprimé créé lors du décolmatage.

Lors d'un à-coup de pression d'air comprimé, nous avons suivi, sur le profil vertical d'une manche filtrante, l'évolution de quelques paramètres caractéristiques de filtration. Ces paramètres sont : la perte de charge et l'accélération du média, la vitesse frontale, la vitesse verticale du jet d'air comprimé. Après analyse et comparaison, ces profils

permettent de juger de l'efficacité d'un décolmatage et de déterminer les zones les mieux décolmatées sur la manche en fonction des conditions opératoires qui lui sont imposées.

Les résultats montrent que les profils sont complètement différents pour une manche à l'état neuf et pour une manche ayant subi un grand nombre de colmatages/décolmatages. La configuration observée à l'état neuf laissait penser que le décolmatage du gâteau s'effectuait par un brusque mouvement du média en haut de manche et, uniquement, par un flux d'air à contre-courant en bas de manche. Les mesures après plus de 200 cycles montrent qu'il existe un brusque mouvement du média sur l'ensemble de la hauteur de la manche

(cf. Figure 15). Ce dernier, à l'origine du décrochage du gâteau de particules, est, de plus, aidé par un flux d'air à contre-courant provoqué par la surpression à l'intérieur de la manche filtrante. Cette surpression est renforcée par l'imprégnation importante des particules à l'intérieur de la structure fibreuse du média.

Les effets de l'à-coup de pression d'air comprimé, s'ils ont été mesurés, ne sont pas pour cela totalement compris (onde de choc, simple augmentation brutale de la pression à l'intérieur de la manche) et doivent encore être étudiés pour être parfaitement maîtrisés. C'est par cette phase de compréhension et de modélisation que passera l'optimisation du décolmatage.

FIGURE 15

Exemple de signaux de ΔP , a (accélération) et V (Vitesse longitudinale) pendant un décolmatage en fonction de la position sur la manche

Example of ΔP , a (acceleration) and V (longitudinal velocity) signals, during unclogging, with respect to sleeve position

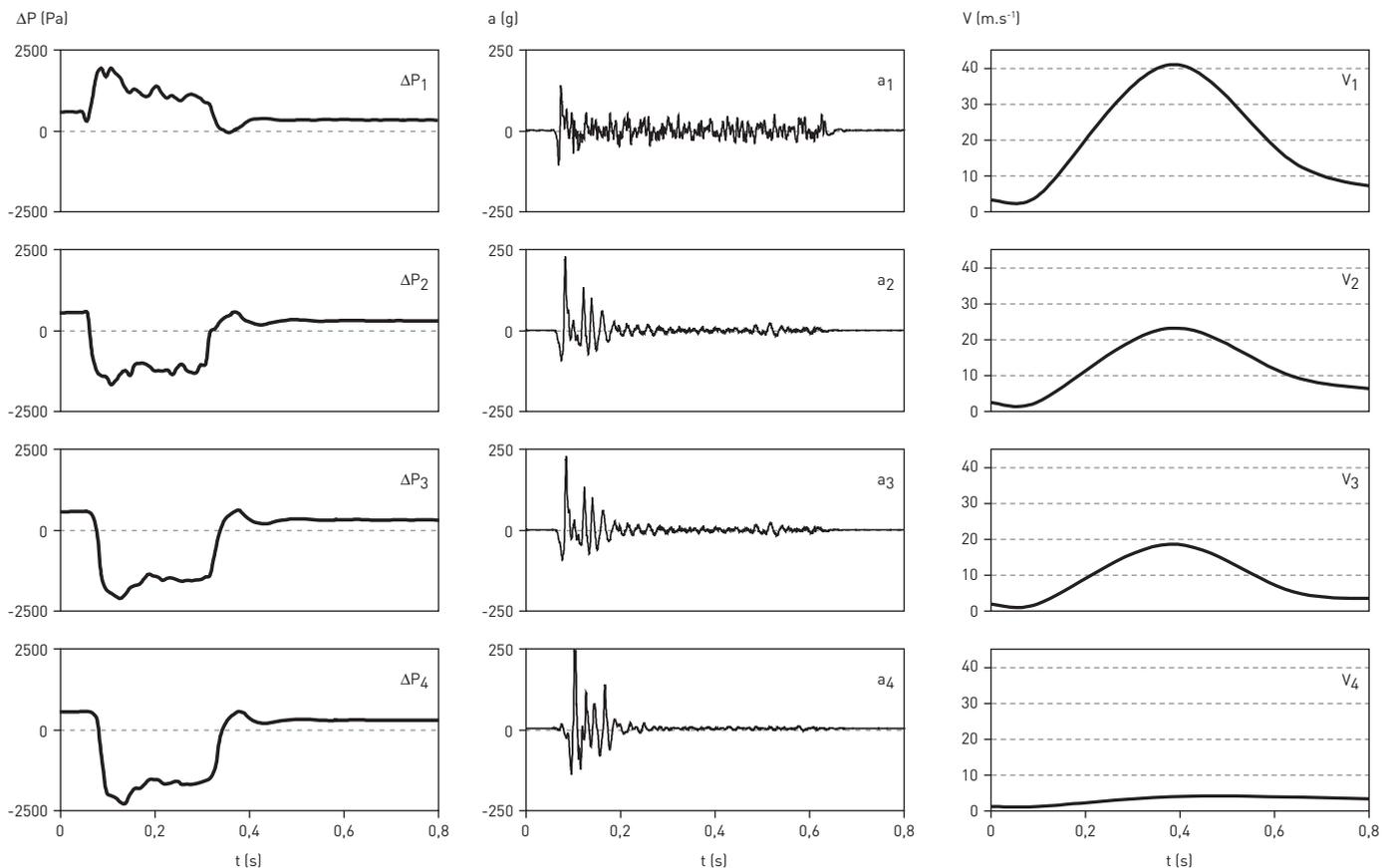
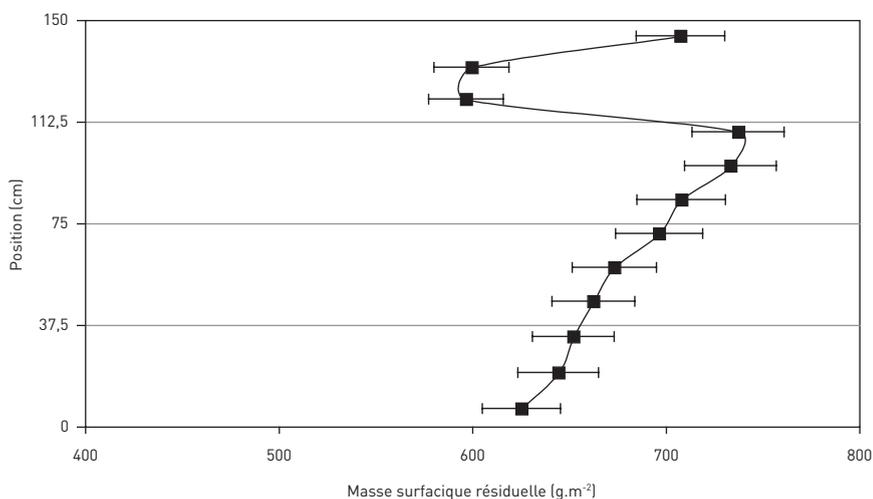


FIGURE 16

Profil de masses surfaciques du média après 250 décolmatages (Masse surfacique moyenne à l'état neuf = 400 g.m^{-2})

Mise en évidence des zones les mieux décolmatées et de la forte imprégnation du média

Medium surface mass profile after 250 unclogging cycles (mean surface mass when new = 400 g.m^{-2}), showing zones best unclogged and heavy medium impregnation



À partir des mesures effectuées sur des manches filtrantes soumises à des à-coup de pression d'air comprimé à contre-courant du sens de filtration, il est possible d'observer que les manches ne sont pas décolmatées d'une manière homogène sur l'ensemble de leur hauteur. Les zones supérieures et inférieures de la manche sont mieux décolmatées que la zone du milieu (cf. Figure 16).

La zone supérieure de la manche semble même soumise à de trop importantes forces de décolmatages car le média se dégrade rapidement dans cette zone (apparition de légères déchirures au niveau des points de couture après seulement 150 cycles).

Après un grand nombre de cycles, le comportement du média et sa réactivité aux à-coups de pression de décolmatage évoluent du fait de la modification de sa structure interne et de l'imprégnation irréversible des fibres par les particules.

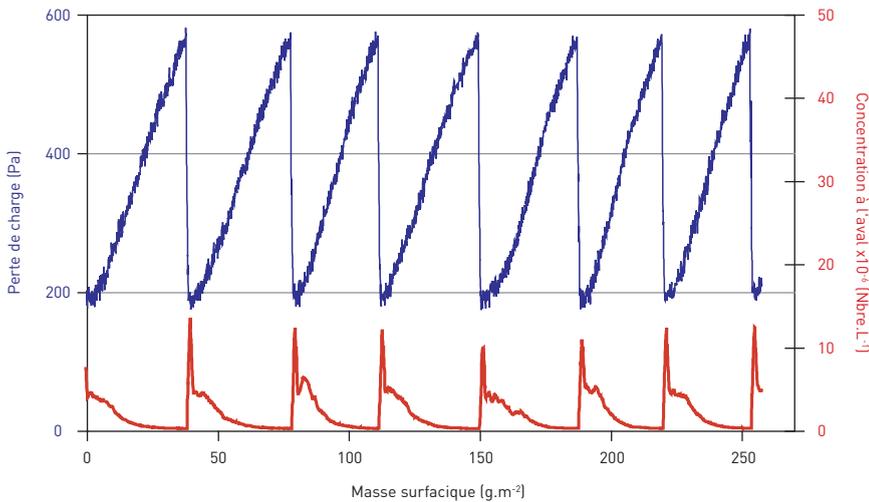
Ces résultats permettent d'accéder à une meilleure compréhension des méca-

FIGURE 17

Observation des bouffées de particules consécutives à des décolmatages sur le dépoussiéreur à poches

Suivi de la perte de charge et de la concentration aval

Observation of particle puffs following unclogging actions on the baghouse dust collector
Pressure drop and downstream concentration monitoring



nismes mis en jeu lors de la phase de décolmatage et de préciser l'influence d'un certain nombre de paramètres tels que la perte de charge maximale avant décolmatage, la pression du réservoir, le diamètre de la buse d'injection et sa position par rapport à l'ouverture de la manche, la durée de l'impulsion, le nombre de manches décolmatées simultanément, la vitesse de filtration ou encore la tension de la manche.

ÉMISSIONS DE PARTICULES LORS DU DÉCOLMATAGE

La compréhension des mécanismes à l'origine des bouffées de particules émises lors des phases de décolmatage par à-coup de pression à l'aval des installations de dépoussiérage (cf. Figure 17) est nécessaire.

La caractérisation de ces bouffées de particules a été menée sur 3 bancs d'essais du laboratoire : médias plans, dépoussiéreur industriel (poches filtrantes) et installation pilote (manches filtrantes). Elle a permis de préciser l'action de l'ensemble des mécanismes à l'origine de l'émission de particules à l'aval. Les mécanismes identifiés sont :

- la disparition partielle du gâteau de particules ;
- la migration de particules dans le média ;

- la remise en suspension de particules à l'amont du fait de la rupture du gâteau ;
- la remise en suspension de particules déposées sur les parois des conduits...

Les contributions de ces différents mécanismes dépendent fortement de l'association « média / aérosol » et, dans une moindre mesure, des conditions opératoires de filtration et de décolmatage. La nature et la taille des particules restent donc des facteurs importants, l'efficacité du média restant décisive au début du fonctionnement d'une installation mais également après un grand nombre de cycles.

Un bon compromis entre tous les paramètres évoqués doit être trouvé et ces travaux devraient permettre de s'appuyer sur des données expérimentales concrètes pour y parvenir. Cependant, des difficultés persistent, notamment dans l'incapacité à pouvoir évaluer la contribution effective de certains mécanismes comme la migration de particules (phénomènes de suintement) ou la remise en suspension du gâteau de particules lors de son décolmatage.

Néanmoins, les comportements suivants ont pu être identifiés avec une assez bonne fiabilité :

■ Pour le couple « média à faible efficacité et diamètre de particules d'alumine < 5 µm », le principal mécanisme à l'origine de la bouffée de particules est attribué à la disparition partielle du gâteau et donc à une baisse d'efficacité du média, associée à une augmentation brusque de la concentration amont.

■ Pour le couple formé par le même média mais avec des poussières de bois (diamètre médian massique > 10 µm), le principal mécanisme est attribué à la remise en suspension de particules provenant du média colmaté (relargage, migrations ?) et des parois de l'installation.

Afin de limiter ce phénomène, préjudiciable à la qualité de l'air recyclé, il est possible d'intervenir sur deux paramètres : la qualité du média et l'optimisation du décolmatage. En ce qui concerne la nature du média, des essais ont montré que l'ajout d'une membrane en PTFE sur la surface filtrante permettait de diminuer très significativement ces bouffées. Mais cette solution se heurte à deux problèmes : le coût plus élevé de ces filtres à membrane PTFE et l'absence de données relative à leur résistance mécanique et donc à leur durée de vie.

L'optimisation du décolmatage est en cours et nous espérons que des solutions simples pourront être proposées prochainement. En ce qui concerne les médias à moyenne efficacité, un compromis doit être trouvé entre l'obligation de réduire le gâteau de particules afin de baisser la perte de charge (décolmatage) et sa conservation, qui est l'assurance d'une bonne efficacité de filtration.

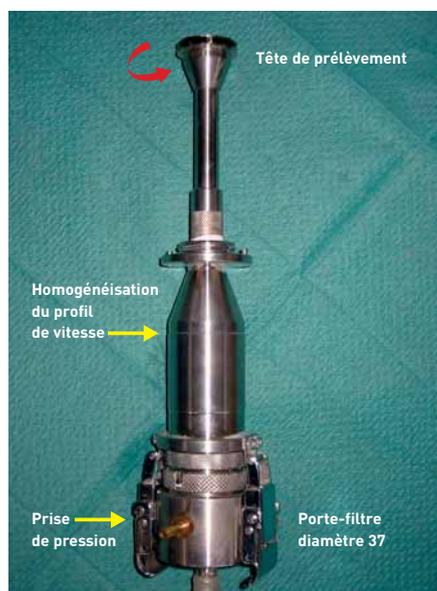
MISE AU POINT D'UN DISPOSITIF DE MESURE CONTINUE DE LA CONCENTRATION MASSIQUE D'UN AÉROSOL

Un dispositif permettant la mesure instantanée de la concentration massique ambiante d'un aérosol vis-à-vis des différentes fractions respirables a été mis au point. Le capteur doit pouvoir tolérer des environnements difficiles (concentrations élevées, projections, température

FIGURE 18

Schéma du dispositif d'échantillonnage et de mesure

Diagram of sampling and measuring system



élevée...), être peu onéreux, et couvrir un domaine de concentrations de 0,1 à quelques dizaines de mg.m⁻³.

Les systèmes, tels que les micro-balances à cristal piézoélectrique, à élément oscillant ou jauges à atténuation bêta, sont généralement peu adaptés aux conditions de prélèvement rencontrés dans les ateliers industriels et aussi trop coûteux. Les appareils optiques, tels que les photomètres et compteurs, ne présentent pas ces inconvénients mais sont, par contre, très sensibles à la nature des particules : taille, forme et indice de réfraction.

Le principe de fonctionnement du système développé consiste à suivre au cours du temps l'évolution de la perte de charge d'un filtre de prélèvement et à établir une corrélation entre cette perte de charge et la concentration massique de l'aérosol prélevé.

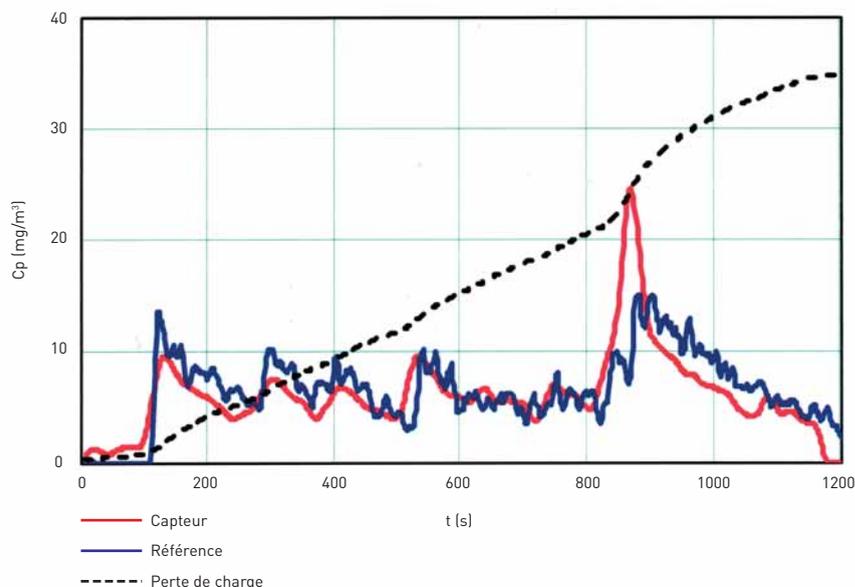
CARACTÉRISTIQUES DU DISPOSITIF

Le dispositif comprend un échantillonneur sur filtre, une pompe, un système de réglage du débit et un capteur de pression différentielle (cf. Figure 18). L'échantillonnage est réalisé au moyen d'une tête de prélèvement pour « poussière totale » mise au

FIGURE 19

Perte de charge du filtre mesurée (----), variation de la concentration donnée par l'appareil de référence (courbe bleue), concentration mesurée par le capteur et déduite de la perte de charge (courbe rouge)

Measured filter pressure drop (----), variation of concentration given by reference instrument (blue curve), concentration measured by sensor and derived from pressure drop (red curve)



point à l'INRS montée sur un porte-filtre. Ce porte-filtre accepte également d'autres types de sélecteurs adaptés à la mesure des différentes fractions respirables. Un filtre plan en fibres de verre à très haute efficacité (Ø 37 mm) est disposé dans le porte-filtre. Le débit d'air est réglé au moyen d'un orifice sonique calibré à 1,5 m³.h⁻¹. Enfin, un capteur de pression différentielle relié à une centrale d'acquisition permet de mesurer en continu l'évolution de la perte de charge du filtre au cours du temps.

PRINCIPE PHYSIQUE

Le principe repose sur la linéarité entre la perte de charge du filtre ΔP (Pa)

et la masse surfacique de particules déposées W (kg.m⁻²). Cette situation se rencontre :

- lorsque la filtration s'opère à la surface du média (filtration sur gâteau) ;
- si les propriétés du gâteau n'évoluent pas dans le temps : colmatage limité, nature des particules inchangée.

L'évolution de la perte de charge peut être alors décrite à partir de la relation suivante :

$$\Delta P = \Delta P_0 + k_2 \cdot \mu \cdot U_f \cdot W$$

avec : ΔP₀, la perte de charge initiale du média ; k₂, le coefficient de résistance spécifique du gâteau (m.kg⁻¹) et U_f, la vitesse de filtration (m.s⁻¹).

TABLEAU III

Avantages et inconvénients du système de mesure
Measuring system advantages and drawbacks

Avantages	Inconvénients
Mesure de la concentration instantanée	Aérosols fins dp < 5 – 10 μm
Étalonnage sur l'aérosol mesuré	Concentration → 0,1 mg.m-3
Facilité d'emploi, robustesse, coût	Pas de mesure directe
Prélèvement individuel	Sensible aux fluctuations de la granulométrie
Analyse ultérieure des particules possible	Pesée des filtres

La concentration massique de l'aérosol à l'instant t est simplement déterminée à partir de la masse surfacique W , déduite de la mesure de ΔP . La masse surfacique W est déterminée par pesée du filtre au début et à la fin du prélèvement. On procède ainsi à chaque fois à l'étalonnage du système de mesure vis-à-vis de l'aérosol mesuré.

Un calcul de la sensibilité massique du capteur montre que celle-ci est proportionnelle au carré du rapport U_f/d_p , d_p désignant le diamètre de la particule.

Afin de valider la méthode, des essais ont été réalisés en laboratoire dans le but de comparer la réponse du dispositif à celle d'un appareil à lecture directe (compteur optique) servant de référence (cf. Figure 19). La courbe en pointillés représente la réponse capteur (ΔP) à partir de laquelle on déduit la concentration à l'instant t .

Par la suite, nous avons utilisé le dispositif afin de suivre l'évolution de la concentration en aérosols au voisinage d'un poste de soudage à l'arc. Le dispositif a permis de mettre en évidence les pics de concentration auxquels le soudeur était soumis.

Les principaux avantages et inconvénients du système sont décrits dans le *Tableau III*.

PERSPECTIVES

Trois actions sont programmées à partir de 2006 :

- Performance des filtres à fibres vis-à-vis des aérosols nanométriques (particules de diamètre < 30 nm) : l'objectif visé est de vérifier si la baisse d'efficacité prévue par la théorie de Wang et Kasper se vérifie expérimentalement.

- Filtration des aérosols semi-volatils, c'est-à-dire formés à partir de composés à très faible tension de vapeur (< 100 mPa à température ambiante) : au cours de leur échantillonnage sur filtre certains types d'aérosols sont susceptibles de s'évaporer partiellement ; une modélisation du phénomène permettrait de prédire les pertes au cours d'un échantillonnage.

- Opération pilote visant à tester, sur un dépoussiéreur à manches installé dans une menuiserie, des solutions permettant d'améliorer la qualité de l'air recyclé (notamment lors du décolmatage) : deux solutions seront expérimentées, remplacement des manches existantes par un média plus performant, dérivation de l'air épuré à l'extérieur du local de travail lors du décolmatage.

ÉQUIPEMENTS DU LFA

Le LFA possède un certain nombre d'équipements spécifiques à la discipline :

- des générateurs d'aérosols solide ou liquide :
 - générateur de poussières à brosse tournante (PALAS RBG 1000),
 - générateur de poussières à trémie vibrante (PALAS BEG 1000 S),
 - générateurs de gouttelettes polydispersées (PALAS PLG 2000 HC),
 - générateurs de gouttelettes monodispersées (PALAS MAG 2010).
- des granulomètres :
 - analyseur de distribution granulométrique de particules submicroniques (SMPS, TSI),
 - impacteur en cascade (ELPI, DEKATI),
 - compteurs optiques (Grimm 1.108, Lasair 310 et 1001).
- 5 bancs d'essais : les caractéristiques de ces bancs sont données ci-dessous :

BANC D'ESSAIS POUR L'ÉTUDE DE LA FILTRATION DES AÉROSOLS PAR DES FILTRES À FIBRES

Site d'implantation :

LSGC

Caractéristiques :

- test des médias plans lors de leur colmatage par des aérosols solides, liquides, \varnothing filtrant 110 mm
- régulation du débit de filtration (0 - 36 m³/h)
- mesure de la perte de charge
- mesure de la perméance des filtres

Remarque : Un nouveau banc d'essais, en cours de mise au point, sera exclusivement dédié à l'étude de la filtration des mélanges d'aérosols solides et liquides.



BANC D'ESSAIS POUR L'ÉTUDE DES CYCLES DE COLMATAGE ET DÉCOLMATAGE PNEUMATIQUE SUR MÉDIAS PLANS

Site d'implantation :

INRS

Caractéristiques :

- test des médias plans, \varnothing 130 mm
- régulation du débit de filtration (0 – 4,8 m³/h)
- mesure de la perte de charge lors de la filtration (0 – 5000 Pa)
- mesure de l'efficacité fractionnelle de filtration par comptage optique
- décolmatage par à-coup de pression à contre courant



BANC D'ESSAIS ÉQUIPÉ D'UN DÉPOUSSIÉREUR INDUSTRIEL À POCHE TORIT

Site d'implantation :

INRS

Caractéristiques :

- dépoussiéreur à poches (12), surface filtrante = 18 m²
- débit de filtration : 800 – 3300 m³/h
- décolmatage par à-coup de pression :
 - séquence de 2 poches / 12s
 - durée de l'impulsion = 110 ms
- suivi de la perte de charge



BANC D'ESSAIS ÉQUIPÉ D'UN DÉPOUSSIÉREUR À MANCHES PILOTE

Site d'implantation :

INRS

Caractéristiques :

- 24 manches cylindriques (hauteur : 1,5 m et diamètre : 0,13 m)
- surface filtrante totale : 14,7 m²
- débit de filtration : 0 – 5000 m³/h
- programmation libre des séquences de décolmatage par à-coup de pression
- modification possible des caractéristiques de la buse de décolmatage (position, diamètre)
- mesure du débit de filtration dans chaque manche (24 venturis)
- mesure de la perte de charge totale
- mesure de la pression relative à l'intérieur de certaines manches
- mesure de l'accélération du média filtrant lors du décolmatage (accéléromètres miniatures Brüel et Kjaer, type 4393 V)



Reçu le : 21/04/2005

Accepté le : 5/01/2006

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. PENICOT, D. THOMAS, P. CONTAL, D. LECLERC, J. VENDEL - *Clogging of HEPA fibrous filters by solid and liquid aerosol particles: experimental study*. FILTRATION and SEPARATION, Vol 36 N° 2 (1999) 235-246.
- [2] D. THOMAS, P. CONTAL, V. RENAUDIN, P. PENICOT, J. VENDEL, D. LECLERC - *Modelling the pressure drop in HEPA Filters during dynamic filtration*. JOURNAL OF AEROSOL SCIENCE, Vol 30 N° 2 (1999) 235-246.
- [3] D.BEMER, R. REGNIER, S. CALLE. - *Separation efficiency of a wood dust collector – Field measurement using a fluorescent aerosol*. THE ANNALS OF OCCUPATIONAL HYGIENE, Vol 44 N° 3 (2000) 173-183.
- [4] D.BEMER, S. CALLE. - *Evolution of the efficiency and pressure drop of a filter media with loading*. AEROSOL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 33 (2000) 427-439.
- [5] D. THOMAS, P. PENICOT, P. CONTAL, D. LECLERC, J. VENDEL - *Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles. Experimental and modelling study*. CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE, Vol 56 N° 11 (2001) 3549-3561.
- [6] S. CALLE, D. BEMER, D. THOMAS, P. CONTAL, D. LECLERC. - *Changes in the performances of filter media during clogging and cleaning cycles*. THE ANNALS OF OCCUPATIONAL HYGIENE, Vol 45 N° 2 (2001) 115-121.
- [7] S. CALLE, P. CONTAL, D. THOMAS, D. BEMER, D. LECLERC. - *Description of clogging and cleaning cycles of filter media*. POWDER TECHNOLOGY, Vol 123 (2002) 40-52.
- [8] D. BEMER, S. CALLE, S. VAXELAIRE, D. THOMAS, P. CONTAL - *Performances des média filtrants utilisés en dépolluierage industriel*. HYGIÈNE ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL - CAHIERS DE NOTES DOCUMENTAIRES - N° 188, 3ème trimestre 2002, 71-77.
- [9] S. CALLE, P. CONTAL, D. THOMAS, D. BEMER, D. LECLERC - *Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles*. POWDER TECHNOLOGY, Vol 128 (2002) 213-217.
- [10] D. BEMER, D. THOMAS, P. CONTAL, I. SUBRA. - *Development of a device for the real-time measurement of the aerosol mass concentration*. APPLIED OCCUPATIONAL AND ENVIRONMENTAL HYGIENE Vol 18 (2003) 577-583.
- [11] T. FRISING, D. THOMAS, P. CONTAL, D. BEMER, D. LECLERC - *Influence of filter fibre size distribution on filter efficiency calculations*. CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH & DESIGN, Vol 81, A9 (2003) 1179-1184.
- [12] P. CONTAL, J. SIMAO, D. THOMAS, T. FRISING, S. CALLE, J.C. APPERT COLLIN, D. BEMER - *Clogging of fibre filters by a submicron aerosol droplets. Phenomena and influence of operating conditions*. JOURNAL OF AEROSOL SCIENCE, Vol 35 N° 2 (2004) 263-278.
- [13] T. FRISING, D. THOMAS, P. CONTAL, D. BEMER, D. LECLERC - *Filtration of solid and liquid aerosol mixtures: pressure drop evolution and influence of solid/liquid ratio*. FILTRATION AND SEPARATION, March 2004, 37-39.
- [14] D. BEMER, X. SIMON, S. CALLE, D. THOMAS, R. REGNIER - *Performance of filtration media dust collectors. Study on flat media and on pilot installation*. GEFAHRSTOFFE REINHALTUNG DER LUFT, Juillet 2004.
- [15] D. BEMER, X. SIMON, S. CALLE, D. THOMAS, R. REGNIER - *Performance des dépolluieres à média filtrant : Étude sur média plan et sur pilote*. HYGIÈNE ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL - CAHIERS DE NOTES DOCUMENTAIRES - N° 194 (2004), 7-14.
- [16] X. SIMON, D. BEMER, S. CALLE, D. THOMAS, R. REGNIER - *Description of the particle puff emitted downstream of different dust separators consecutive to pulse-jet cleaning*. FILTRATION, Vol 5 (1), pp. 52-61, 2005.
- [17] X. SIMON, D. THOMAS, D. BEMER, S. CALLE, R. REGNIER, P. CONTAL - *Influence of cleaning parameters on pulse-jet filter bag performance*. FILTRATION, Vol. 4, n° 4, octobre 2004, pp. 253 - 260.
- [18] D. THOMAS - "Étude de la filtration des aérosols par des filtres à fibres" Habilitation à Diriger des Recherches, Université Henri Poincaré, 19 décembre 2001.
- [19] P. PENICOT-BAUGE - "Étude de la performance de filtres à fibres lors de la filtration d'aérosols liquides ou solides submicroniques" Doctorat INPL, 23 octobre 1998.
- [20] S. CALLE - "Influence des cycles de colmatage et décolmatage sur l'évolution des performances des médias filtrants utilisés en dépolluierage industriel", Doctorat INPL, 21 octobre 2000.
- [21] T. FRISING - "Étude de la filtration des aérosols liquides et des mélanges d'aérosols solides et liquides", Doctorat INPL, 22 octobre 2004.