

PERFORMANCES DES MÉDIAS FILTRANTS DES ASPIRATEURS UTILISÉS EN BOULANGERIE

La poussière de farine est la principale cause d'allergie respiratoire professionnelle en France. Les sources d'émission de poussière dans l'atmosphère de travail des boulangeries sont nombreuses et différents moyens peuvent être mis en œuvre afin de diminuer les expositions. Les opérations de nettoyage des surfaces et des machines constituent une importante source d'émission de poussière. C'est la raison pour laquelle l'emploi d'aspirateurs industriels est particulièrement intéressant dans la mesure où ces appareils mobiles permettent d'éviter l'utilisation des soufflettes à air comprimé à l'origine de fortes dispersions de poussière. Les performances de filtration de différents médias proposés par les industriels ont été mesurées et comparées à celles proposées par la norme EN 60335-2-69 (1997) relative aux aspirateurs industriels et classant les dispositifs de filtration en trois catégories (L, M et H). En regard de la granulométrie très grossière des poussières de farine et des valeurs limites d'exposition élevées, des filtres de classe L sembleraient suffisants. Par contre, les appareils devraient être testés selon le protocole correspondant à la classe M afin de prendre en compte les fuites éventuelles.

A l'origine d'un cas d'asthme professionnel sur cinq, la farine est la première cause d'allergie respiratoire professionnelle en France. On recense 32 000 boulangeries et boulangeries-pâtisseries artisanales dans lesquelles travaillent 79 000 salariés, 16 000 apprentis et 61 000 artisans. Dans une boulangerie, les sources d'émission de poussières de farine sont nombreuses : opérations de transport, remplissage des pétrins, fleurage (saupoudrage), phases de nettoyage. En ce qui concerne ce dernier point, le recours à un aspirateur industriel est une solution intéressante dans la mesure où ces appareils mobiles, généralement bien acceptés par les opéra-

teurs, permettent d'éviter l'utilisation des soufflettes à air comprimé particulièrement nuisibles. Pour être efficaces, ces aspirateurs doivent garantir un débit d'aspiration nominal et une efficacité de filtration minimale¹. Dans le cadre de la campagne « Outils plus sûrs » engagée par la CNAMTS, l'INRS a réalisé une étude visant à déterminer les performances de quelques médias filtrants représentatifs de ceux équipant les aspirateurs employés en boulangerie.

¹ Les risques d'inflammation et d'explosion éventuels des poussières mises en suspension n'ont pas été pris en compte dans cette étude.

- Boulangerie
- Aspirateur
- Filtre
- Efficacité
- Farine
- Poussière

► Denis BÉMER, Isabelle SUBRA,
Roland RÉGNIER, Jean-Michel DESSAGNE
INRS, Département Ingénierie des procédés
► Guy VERNOIS
INRS, Département Équipements de travail
et ergonomie

FILTER MEDIUM PERFORMANCE IN BAKERY VACUUM CLEANERS

Flour dust is the main cause of occupational breathing allergies in France. There are many sources of dust emission into a bakery working atmosphere and different means can be implemented to reduce exposure. Surface and machine cleaning operations represent a major source of dust emission. This is why the use of industrial vacuum cleaners is especially advantageous to the extent that these mobile appliances allow the use of compressed air blasting nozzles, which cause extensive dust dispersion, to be avoided. Performance characteristics of different filter media proposed by manufacturers have been measured and compared to those included in European Standard EN 60335-2-69 (1997) for industrial vacuum cleaners, which classifies filter devices into three categories (L, M and H). Class L filters would appear sufficient in view of the very coarse particle size distribution of flour dust and the high exposure limiting values. On the other hand, devices should be tested according to the procedure for class M to take possible leakage into account.

- Bakery
- Vacuum cleaner
- Filter
- Efficiency
- Flour
- Dust

MÉDIAS TESTÉS

Six médias proposés notamment pour la filtration des poussières de farine ont été testés. Leurs caractéristiques sont données *tableau 1*.

L'épaisseur (h) a été mesurée par microscopie électronique à balayage. G est le grammage (masse surfacique) déterminé par pesée. $\Delta P/U_f$ représente le ratio de la perte de charge du média (ΔP) par la vitesse de filtration (U_f). Ce ratio a été établi pour chaque média à partir de la pente de l'évolution de la perte de charge en fonction du débit, cette évolution étant linéaire en régime laminaire.

Tous les médias présentent un traitement de surface de la face filtrante permettant de limiter l'adhésion de la couche de particules et facilitant ainsi le décolmatage. Le plus classique des traitements est le calandrage thermique (CT). D'autres disposent d'une membrane mono-filament composée de fibres submicroniques en polytétrafluoroéthylène (PTFE). Ces membranes, en plus de leurs propriétés anti-adhésion, permettent d'augmenter très significativement l'efficacité de filtration. La *Figure 1* représente cette couche en PTFE du média 2 (cf. *Tableau 1*) obtenue par microscopie électronique.

Le média 6 a la même référence que le média 5 mais leurs propriétés diffèrent sensiblement : le média 6 a été découpé dans un sac filtrant d'aspirateur alors que le média 5 est un échantillon plan fourni par le fabricant.

ESSAIS

EFFICACITÉ INITIALE

On a procédé à la mesure de l'efficacité de filtration des filtres neufs (cf. *définitions Encadré p. 6*). Les essais ont été effectués sur le banc de test des médias de l'INRS [1]. La méthode utilisée s'inspire de la norme EN 779 [2] concernant les filtres de ventilation générale. Elle consiste à générer, en amont du média testé, un aérosol polydispersé constitué de particules d'acétate de vinyle et à mesurer les concentrations

TABLEAU 1

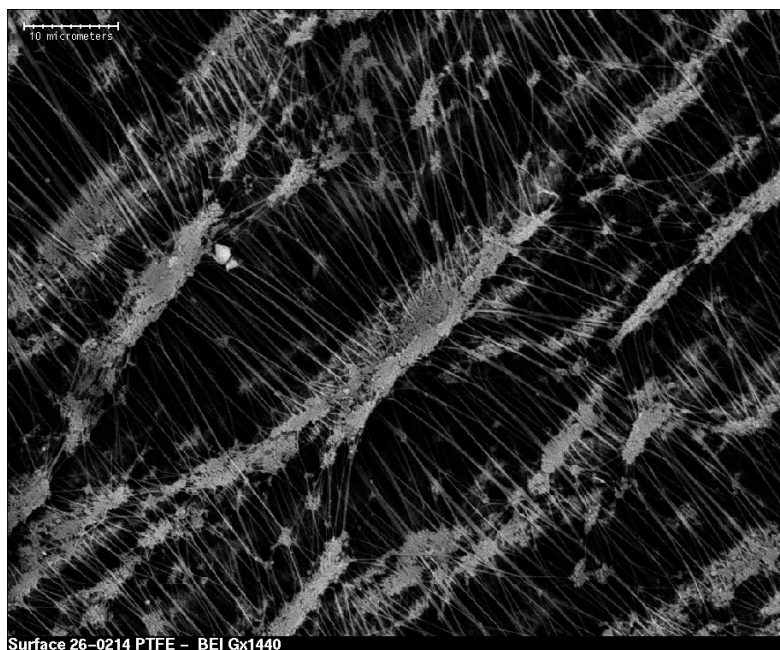
Caractéristiques des médias Medium characteristics

Média	Nature	h (mm)	G (g.m ⁻²)	$\Delta P/U_f$ (Pa.m ⁻¹ .s)	Classe
1	Polyester + CT, 400 g/m ²	1,1	396	1244	BIA G ⁽¹⁾
2	Polyester + PTFE, 475 g/m ²	1,7	468	2619	BIA C ⁽¹⁾
3	Polyester + PTFE, 530 g/m ²	1,6	529	1217	BIA C ⁽¹⁾
4	Polyester + CT	1,5	528	2324	BIA G ⁽¹⁾ L ⁽²⁾
5	Polyester + polyuréthane	1,5	500	2062	BIA C ⁽¹⁾ M ⁽²⁾
6	Polyester + polyuréthane	1,3	466	1671	BIA C ⁽¹⁾ M ⁽²⁾

- (1) Ancienne classification des filtres en quatre classes par ordre croissant d'efficacité U, S, G et C d'après une méthode mise au point par le Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (Allemagne).
(2) Nouvelle classification d'après la norme NF EN 60335-2-69 annexe AA (1997) en trois classes par ordre croissant d'efficacité L, M et H (cf. Annexe).

FIGURE 1

Photo en microscopie électronique à balayage de la face filtrante du média 2 montrant les microfibrilles de la membrane en PTFE
Scanning electron microscope photo of medium 2 filtering face showing PTFE membrane microfibrilles



amont et aval par comptage optique à l'aide d'un compteur optique (PMS Lasair 310) possédant huit canaux de 0,3 à 10 μm .

La procédure consiste à effectuer six prélèvements amont/aval répétés deux fois. Le résultat est exprimé sous la forme d'une courbe d'efficacité en fonc-

tion du diamètre des particules (d_p) (moyenne établie à partir de 2 x 6 prélèvements), avec les incertitudes de mesure associées. L'efficacité (E) a été déterminée pour une vitesse de filtration $U_f = 6 \text{ cm.s}^{-1}$ (débit = 43 NL.min^{-1} , média de diamètre 130 mm). Les résultats sont présentés *Figure 2*.

TABLEAU II

Facteurs d'efficacité des médias
(ratio ΔP /efficacité)
Medium efficiency factors
(ΔP /efficiency ratio)

Médias	$\Delta P/E_{1,5\mu m}$ (Pa)
1	111
2	158
3	76
4	337
5	145
6	131

Les médias étudiés présentent des efficacités très différentes à l'état neuf. Les médias 2 et 3 ont une efficacité élevée alors que les médias 1, 4, 5 et 6 peuvent être considérés comme des filtres à moyenne efficacité, le média 4 étant le moins efficace.

Le ratio ΔP /efficacité, appelé facteur d'efficacité, permet de mieux appréhender l'efficacité d'un média. En effet, un média est d'autant plus efficace que ce facteur est faible. Le *Tableau II* donne les valeurs du facteur d'efficacité calculées pour les différents médias testés. L'efficacité utilisée pour le calcul du facteur est définie pour un diamètre de particule de 1,5 μm .

Le média 3 présente le plus faible facteur d'efficacité. À l'état neuf, ce média est donc le plus performant parmi les six testés.

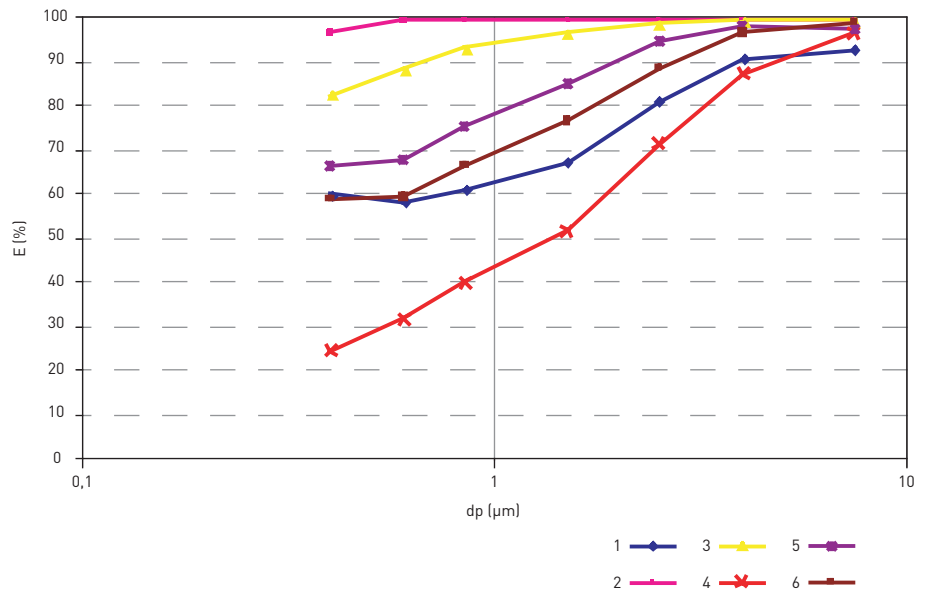
COLMATAGE

À partir du média le moins performant présentant le facteur d'efficacité le plus élevé (média 4), on a suivi de l'évolution de l'efficacité et de la perte de charge au cours de quelques cycles de colmatage et décolmatage. En effet, certains matériels disposent d'un système de régénération de la perte de charge par décolmatage des filtres, souvent par secouage mécanique ou par injection d'air comprimé. L'efficacité et la perte de charge présentent alors une évolution de nature cyclique.

L'aérosol de colmatage est obtenu à partir d'une poussière calibrée d'alumine présentant un diamètre médian massique de l'ordre de 3,2 μm . Ce diamètre médian est très proche de celui de la

FIGURE 2

Efficacité fractionnelle initiale des différents médias
Initial fractional efficiency of different media



poussière calcaire retenue pour les tests de la norme EN 60335-2-69 (cf. *Annexe*). Le décolmatage est réalisé sur le banc par injection d'air comprimé à contre courant. Il est déclenché lorsque la perte de charge atteint une valeur limite prédéfinie, appelée perte de charge maximale (notée ΔP_{max}), égale à cinq à dix fois la perte de charge initiale (ΔP_0 du média neuf). Les variations de l'efficacité sont déterminées par comptage optique en aval du filtre [2]. La *Figure 3* représente les variations de la perte de charge et de l'efficacité totale en masse du média 4.

La baisse d'efficacité observable lors du décolmatage est due à la disparition partielle du gâteau de filtration, le média retrouvant momentanément une efficacité proche de celle correspondant à l'état neuf. Par la suite, le gâteau se reforme progressivement et l'efficacité augmente rapidement pour atteindre des valeurs proches de 100 % correspondant à la filtration sur gâteau. On constate que l'efficacité moyenne en cours de fonctionnement dépend fortement de l'efficacité du média à l'état neuf (après décolmatage) ainsi que de la durée du cycle, et donc de la perte de charge maximale. La *Figure 3* montre qu'un filtre de moyenne efficacité peut présenter des efficacités massiques élevées (> 99 %) grâce au phénomène de filtration sur gâteau (auto-filtration des particules).

Des essais identiques, non décrits dans ce document, ont été menés avec le média 2 doté d'une membrane PTFE. Les résultats montrent une très nette amélioration des performances apportée par cette membrane, à la fois sur le plan de l'efficacité et sur celui du décolmatage [3]. Néanmoins, ces membranes présentent l'inconvénient d'être fragiles et coûteuses ; en outre, la stabilité de leurs performances au cours du temps n'est pas bien établie.

APPLICATION À LA FILTRATION DES POUSSIÈRES DE FARINE

Nos essais ont permis de mettre en évidence des différences de performances significatives entre les médias à l'état neuf, surtout pour les fines particules ($d_p < 5 \mu m$). En fait, deux éléments expliquent la faible différence entre médias (observée au cours du colmatage) :
 ■ lors du colmatage, l'efficacité augmente rapidement grâce à la filtration sur gâteau. L'efficacité est alors contrôlée par le gâteau de particules et non par les propriétés du média ;
 ■ les poussières de farine présentent des granulométries très grossières avec des diamètres médians en masse élevés de l'ordre de 50 à 100 μm . L'efficacité dans ce domaine de dimensions est toujours très élevée, même pour des médias a priori peu performants.

FIGURE 3

Variation de l'efficacité totale en masse (E, bleu) et de la perte de charge (rouge) au cours des cycles - Média 4 (polyester avec calandrage thermique)
 Variation in mass total efficiency (E, blue) and head loss (red) during cycles - Medium 4 (polyester with thermal liner)

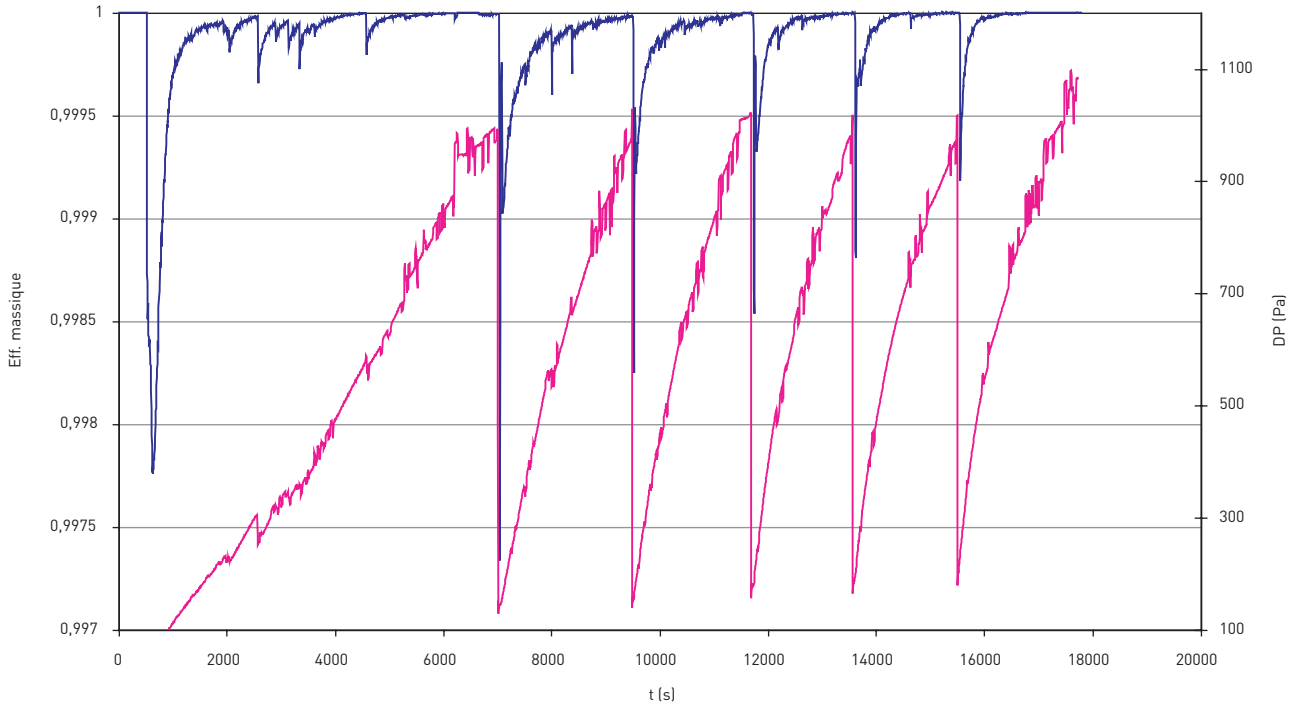


TABLEAU III

Résultats de mesure de l'efficacité du média 4. Colmatage à la poussière de farine

Efficiency measurement results for medium 4 - Flour dust clogging

C_{aval} ($mg \cdot m^{-3}$)	0,42
Q ($L \cdot min^{-1}$)	39
Δt	1 h 38 min
M_f (mg)	1 620
ΔP_0 (Pa)	35
ΔP_f (Pa)	220

L'efficacité du média 4 a été mesurée au cours d'un colmatage par de la poussière de farine. L'efficacité totale massique a été déterminée à partir des paramètres suivants :

$$E = 1 - \frac{C_{aval} \cdot Q \cdot \Delta t}{M_f}$$

C_{aval} est la concentration massique en poussière de farine en aval du filtre (mesurée par prélèvement isocinétique sur un filtre en fibres de verre Whatmann GF/Ø 47 mm), Q est le débit

d'air et M_f la masse de farine recueillie sur le filtre test (média 4) et déterminée par pesée. Δt est la durée de l'expérience de colmatage. ΔP_0 et ΔP_f sont respectivement les pertes de charge initiale et finale (en fin de colmatage).

Les résultats sont donnés *Tableau III*. L'efficacité correspondante est égale à 99,90 %.

Cette expérience confirme, que pour ce domaine de tailles de particules, l'efficacité totale massique d'un filtre a priori peu performant peut être très élevée.

CONCLUSION

En France, aucune valeur limite spécifique n'est retenue pour les poussières de farine. La valeur limite de moyenne d'exposition à la poussière de farine retenue (VME) est par conséquent celle des poussières inertes, fixée en France à $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ pour la fraction totale

($4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ en Allemagne, $3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ en Suède et $0,5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ aux États-Unis) [4]. Une étude suédoise a également montré que le risque de rhinite allergique était augmenté aux concentrations supérieures à $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ [5].

Un filtre de classe L, selon la norme EN 60335-2-69 (cf. *Annexe*), semble suffisant en regard des caractéristiques granulométriques de ces poussières. Par contre, pour la classe L, la norme ne prévoit pas de tester l'aspirateur dans son ensemble à la différence des classes M et H. Les défauts de montage du filtre et de la qualité de l'étanchéité ne peuvent donc être appréciés. C'est pourquoi il est proposé d'appliquer, pour les aspirateurs de poussière de farine, le même protocole de test que celui correspondant à la classe M, à savoir le test du média ainsi que le test de l'appareil mais en retenant les critères de performance de la classe L.

Reçu le 20/01/2005
 Accepté le 26/01/2005

ANNEXE

Classification proposée par la norme EN 60 335-2-69 Annexe AA (1997) relative aux aspirateurs industriels et épurateurs montés sur des machines.

La norme fournit un tableau (cf. *Tableau A1*) présentant une classification en trois classes (L, M et H) des appareils reposant, d'une part, sur l'efficacité et, d'autre part, sur la valeur limite correspondant à l'aérosol (VL).

La méthode d'essai retenue est conforme à la norme EN 1093-6 (cf. *Figure 4*). La poussière test est une poussière de calcaire dont 75 % de la concentration en nombre est inférieur à $5 \mu\text{m}$ (25 % pour $d_p < 2 \mu\text{m}$). Selon la classe considérée, les tests peuvent être effectués sur l'appareil complet (aspirateur), sur un élément filtrant ou sur un échantillon de média. La classe L ne permet pas la qualification de l'ensemble de l'appareil. Les tests se déroulent sur un cycle de colmatage de l'élément filtrant jusqu'à atteindre le débit d'aspiration minimum. Si les filtres sont prévus pour être décolmatés, les tests prévoient également d'inclure des phases de décolmatage dans la mesure de la perméance (non décrits dans la norme mais dans une note technique du BIA 2002 [6]).

TABLEAU A1

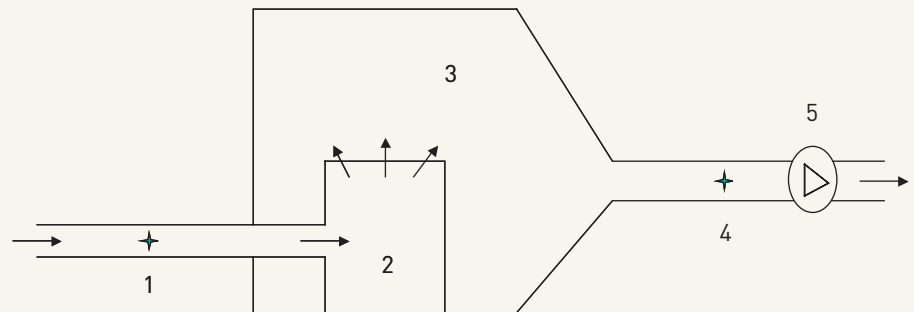
Limites de pénétration des appareils
Appliance penetration limits

Classe	VL (mg.m^{-3})	Perméance (%)	Vitesse de filtration ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}.\text{m}^{-2}$)	Test		
				média	élément	ensemble
L (risque faible)	> 1	< 5 (< 1 ^[2])	≤ 500	x		
M (risque moyen)	> 0,1	< 0,5 (< 0,1 ^[2])	≤ 200	x		x
H (risque élevé)	particules fines ^[1] , incluant les particules cancérigènes et pathogènes	< 0,005	≤ 200		x	x

(1) La définition d'une particule fine n'est pas précisée.

(2) Perméances présentées dans une note technique du BIA (2002).

FIGURE 4

Banc d'essai pour la méthode de test selon la norme EN 1093-6
Test bench for EN 1093-6 testing method


(1) Génération de la poussière test (débit massique connu).

(2) Aspirateur en test.

(3) Cabine ventilée.

(4) Mesure de la concentration aval.

(5) Ventilateur à l'aspiration.

DÉFINITIONS

Efficacité de filtration : 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 :

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

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 filtre à très haute efficacité (THE) est un filtre présentant une efficacité minimale initiale supérieure à 85 % selon la norme EN 1822 (1997).

La perméance (P) définit la fraction d'aérosol qui traverse la filtre et est égale à : $P = 1 - E$

Perte de charge : La perte de charge est la différence de pression statique aux bornes amont et aval du filtre. Elle est exprimée en mm CE ou en Pa (1 mm CE = 10 Pa). La perte de charge d'un filtre à moyenne efficacité est comprise entre 50 et 100 Pa au débit nominal et celle d'un filtre à très haute efficacité entre 150 et 250 Pa.

Vitesse de filtration : La vitesse de filtration, notée U_f ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), est définie par le ratio du débit d'air filtré par la surface de filtration. Les fabricants parlent plutôt de taux de charge ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) qui est une notion identique. En dépoussiérage sur manches, les vitesses de filtration rencontrées classiquement sont comprises entre 2 et 8 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (taux de charge entre 70 et 300 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$). Pour les aspirateurs de poussières industriels, des valeurs plus élevées sont souvent préconisées.

Compteur optique : Un compteur optique est un appareil exploitant les propriétés de diffusion de la lumière par les particules (effet Tyndall) afin de mesurer leur nombre par unité de volume d'air dans une classe granulométrique donnée. La concentration totale massique peut être calculée à partir des concentrations en nombre mesurées pour chaque classe granulométrique en faisant l'hypothèse de la sphéricité des particules. Elle est obtenue en appliquant la relation suivante :

$$C_m = \frac{\pi \cdot \rho_p}{6} \cdot \sum_{i=1}^n C_{n_i} \cdot \overline{d_{p_i}}^3$$

avec :

ρ_p , la masse volumique de la particule ;
 C_m , la concentration massique ;
 $\overline{d_{p_i}}$, le diamètre médian de la classe granulométrique i ;
 C_{n_i} , la concentration en nombre de la classe i et n le nombre de classes du compteur.

BIBLIOGRAPHIE

[1] D. BÉMER, S. CALLÉ et al. - *Performances des médias filtrants utilisés en dépoussiérage industriel - Méthode de test*. INRS, HST/CND, 2002, 188, pp. 71-77.

[2] NF EN 779 - *Filtres à air de ventilation générale pour l'élimination des particules - Détermination des performances de filtration*. AFNOR (2002).

[3] D. BÉMER, X. SIMON, S. CALLÉ et al. - *Performances des dépoussiéreurs à média filtrant*. INRS, HST/CND, 2004, 194, pp. 7-14

[4] N. ROSENBERG - *Prévention des allergies respiratoires professionnelles en boulangerie-pâtisserie*. INRS, DMT, 2002, 90, p. 111-129.

[5] *Allergies respiratoires du boulanger*. INRS, DMT, 2002, 90, p. 189-196.

[6] *Maschinen zur beseitigung gesundheitsgefährlicher Stäube - Positivliste*. BIA Handbuch 43.Lfg. VI (2003).