



HAL
open science

Etude de la phase de filtration profonde et de la transition vers la phase de filtration en surface pour des filtres THE colmatés avec des aérosols manométriques

Soleiman Bourrous, Laurent Bouilloux, François-Xavier Ouf, Jean-Christophe Appert-Collin, Dominique Thomas, Ludovic Tampère

► **To cite this version:**

Soleiman Bourrous, Laurent Bouilloux, François-Xavier Ouf, Jean-Christophe Appert-Collin, Dominique Thomas, et al.. Etude de la phase de filtration profonde et de la transition vers la phase de filtration en surface pour des filtres THE colmatés avec des aérosols manométriques. 28ème Congrès Français sur les Aérosols, Jan 2013, Paris, France. pp.37. <hal-00872999>

HAL Id: hal-00872999

<https://hal.science/hal-00872999v1>

Submitted on 14 Oct 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

ETUDE DE LA PHASE DE FILTRATION PROFONDE ET DE LA TRANSITION VERS LA PHASE DE FILTRATION EN SURFACE POUR DES FILTRES THE COLMATÉS AVEC DES AÉROSOLS NANOMETRIQUES.

S. Bourrous* (1 2 3), L. Bouilloux (1), F.-X. Ouf (1), J.-C. Appert-Collin (2), D. Thomas (2) et
L. Tampère (3)

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

Soleiman.Bourrous@irsn.fr

(2) *Université de Lorraine, LRGP, UPR 3349 CNRS, 1 rue Grandville BP 20451, 54001 Nancy, France*

(3) *Camfil Farr, BP80225 Rte d'Avrigny, ZI de Saint Martin Longueau, 60722 Pont Sainte Maxence, France*

TITLE

Study of the deep filtration phasis and the transition to surface filtration for HEPA filters clogged with nanometrics aerosols.

ABSTRACT

Most of the air treatment techniques use fibrous filters made of glass fiber because of their easiness and good value for money. Moreover, their use in specific sectors such as nuclear industry needs a very high filtration efficiency and reliability. In case of fire, the production of very fine soot particles conducts quickly to a high pressure drop, which could lead to break the filter. Predicting the pressure drop is a key issue for maintaining the containment of radioactive substances in a nuclear facility. The aim of the present study is to develop a new approach in order to model the clogging of HEPA filters by nanoparticles. We used a Palas GFG 1000 generator to clog two kinds of fiber glass medium (High and Very High Efficiency). Observation and analysis techniques were used to understand the phenomena and to suggest a predictive model for HEPA filters pressure drop exposed to nanoparticles.

RESUME

La majorité des techniques de traitement de l'air passent par l'utilisation de media fibreux à base de fibres de verre du fait de leur simplicité de mise en œuvre et de leur bon rapport prix/performance. En outre, leur application dans des secteurs spécifiques, comme l'industrie nucléaire, nécessite une très haute efficacité de filtration et une grande fiabilité. En cas d'incendie, la production de particules de suies de très faibles dimensions engendre un colmatage très rapide des filtres, susceptible de conduire à leur altération. La prédiction de la perte de charge est donc un élément important pour le maintien de la fonction de sûreté des dispositifs de ventilation et de confinement. La présente étude vise à proposer une approche afin de modéliser plus fidèlement le colmatage des filtres THE par des aérosols nanométriques. Pour cela, un générateur de nanoparticules Palas GFG 1000 monté sur une veine aéraulique permet le colmatage de différents media plans (THE et HE). Des techniques d'analyse et d'observation spécifiques (enrobage d'échantillons dans une matrice polymérisée et observation de coupes de media colmatés couplée à une analyse EDX) sont utilisées pour comprendre la phénoménologie en vue de proposer des pistes pour l'établissement d'un modèle prédictif de la perte de charge des filtres THE par des aérosols nanométriques jusqu'à la formation du gâteau.

1. Introduction

La filtration d'aérosols nanométriques par un medium fibreux est à l'heure actuelle encore peu abordée dans la littérature scientifique. Cela est dû au fait que, durant son cycle de vie normal, le filtre y est très peu exposé. Toutefois, dans une problématique de sûreté des installations nucléaires et de protection du travailleur lors d'expositions aux nanoparticules (Bemer et al. 2013), l'établissement d'un modèle pouvant rendre compte du colmatage d'un filtre par ces particules très fines est nécessaire. Dans le but de mieux comprendre ce phénomène, deux approches sont alors utilisées, l'une, macroscopique, qui consiste à suivre la perte de charge d'un filtre durant son cycle de vie dans des conditions de colmatage maîtrisées, l'autre, microscopique, en observant et en mesurant les paramètres qui jouent un rôle dans cette évolution de perte de charge, à savoir, la porosité du dépôt de particules et le profil de pénétration des aérosols.

La présente étude ne traite que du profil de pénétration et laisse la porosité (problématique complexe car dépendante de nombreux facteurs) à des travaux ultérieurs. Les différentes étapes entreprises dans cette étude sont développées ci-après, avant de présenter les résultats acquis et de proposer un modèle prédictif du point de transition entre les phases de colmatage relatives à la filtration en profondeur et à la filtration en surface. L'établissement d'un modèle de colmatage basé sur des travaux effectués sur des media non fibreux nécessite de s'appuyer sur une base de données expérimentale plus fournie.

2. Méthode

2.1. Caractérisation du medium – épaisseur et compacité

La première étape de ce travail consiste en la détermination des caractéristiques principales du medium. Pour cette étude, le medium CAMFIL FARR H14 (Très Haute Efficacité) et le medium H11 (Haute Efficacité), à titre de comparaison, sont utilisés.

Pour mesurer l'épaisseur et la compacité, une méthode simple et permettant de s'affranchir des mesures par palpation et par pesée est appliquée. Pour ce faire, l'observation directe au microscope électronique à balayage d'une tranche de medium enrobé dans une résine de type Epoxy est réalisée. Dans un premier temps, le medium est enrobé puis cette résine contenant le filtre est coupée et polie afin d'en observer la tranche (figure 1). Une mesure directe de l'épaisseur en plusieurs points est ainsi possible.

La compacité est, quant à elle, mesurée via la détection élémentaire EDX (Energy Dispersive X-Ray). Après s'être assuré que la quantité de silicium présent était homogène dans toutes les fibres du filtre, une fibre épaisse est choisie comme référence (porosité nulle). Cette valeur de référence est ensuite comparée à une valeur mesurée sur une surface complète de medium. Le ratio des signaux relevés donne ainsi une valeur précise de la compacité du medium. La figure 2 illustre la mesure de compacité.



Figure 1 : image d'un medium enrobé

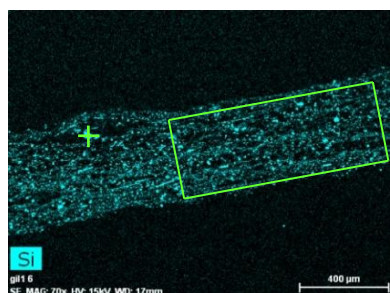


Figure 2 : cartographie EDX du silicium sur une coupe du medium H14 (la croix verte représente la mesure de référence, le rectangle la surface de mesure de compacité)

2.2. Caractérisation des aérosols

Afin de générer des particules nanométriques, un générateur à décharge d'étincelles GFG 1000 et des électrodes d'argent sont utilisés.

Les électrodes d'argent ont la propriété de générer des particules quasi sphériques et dans un état non aggloméré, les problématiques d'agglomération et de morphologie des particules ne sont donc pas investiguées.

2.3. Colmatage

Le colmatage est assuré par un banc analytique comportant le générateur d'aérosols, une veine de rejet assuré par un filtre BAG et un porte-filtre avec un capteur de pression pour assurer le suivi de la perte de charge de celui-ci (figure 3). La régulation du débit est assurée par un débitmètre massique à fil chaud et le débit est maintenu par une pompe.

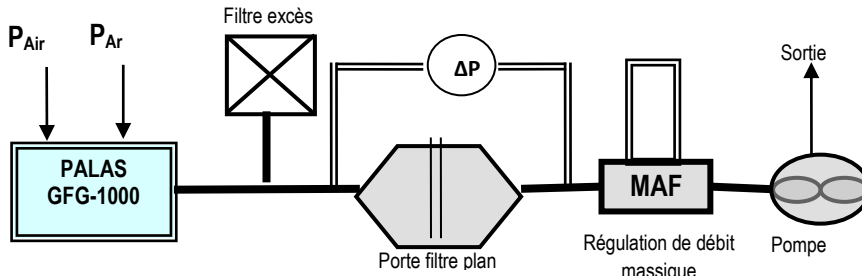


Figure 3 : Banc analytique de colmatage des filtres plans

La production du générateur est constante au cours du temps. Le débit est maintenu constant et assure une vitesse nominale de filtration (2,5 cm/s). Les conditions de température et d'hygrométrie sont les conditions atmosphériques normales, celles-ci n'influencent pas les

résultats.

2.4. Profil de pénétration des aérosols dans le medium

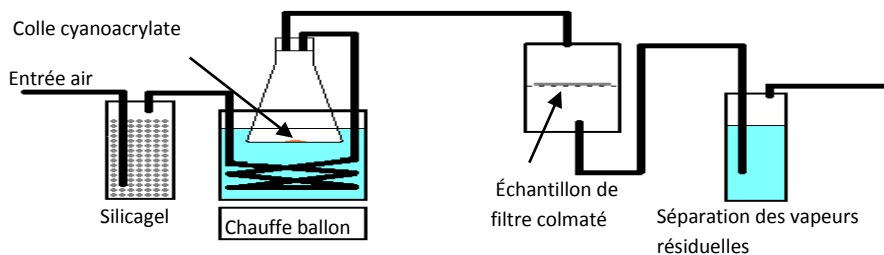


Figure 4 : dispositif de fixation des filtres colmatés (Schmidt, 1990)

La phase de filtration profonde se définit comme la première étape du colmatage d'un filtre. A ce stade, la pénétration des aérosols au sein du medium conditionne l'évolution de la perte de charge.

Ainsi, pour déterminer ce profil de pénétration, la méthode décrite par Schmidt (Schmidt 1990), destinée à mesurer l'épaisseur de gâteau, a été étendue à la mesure de profil de pénétration (figure 4). Dans un premier temps, un échantillon de filtre colmaté est soumis à une vapeur de colle de type Cyanoacrylate puis enrobé dans une résine. Pour mesurer la répartition des aérosols, la méthode de cartographie EDX est utilisée sur la coupe du medium (selon une méthode proche de celle utilisée pour la mesure de compacité du medium vierge).

3. Résultats

3.1. Caractérisation du medium - épaisseur et compacité

Tableau 1 : valeurs moyennes et intervalles des mesures de compacité et d'épaisseur

	H14	H11
Epaisseur moyenne [µm]	450 ± 90	420 ± 60
Compacité moyenne [-]	0,078 ± 0,003	0,065 ± 0,004

sont conformes aux valeurs attendues pour ce type de medium.

Les résultats d'épaisseur et de compacité sont issus d'une centaine de mesures. Il apparaît que l'épaisseur du medium, de par sa nature fibreuse, est très hétérogène, ce qui rend la comparaison difficile avec des méthodes de mesure par palpation d'une surface très large. En revanche, les résultats

3.2. Caractérisation des aérosols

Les aérosols utilisés dans cette étude ont été mesurés à l'aide d'un SMPS. Les particules sont très peu polydispersées (tableau 2). Rappelons que les particules

Tableau 2 : diamètre de mobilité moyen des aérosols générés

Nature des électrodes	Ag (10490 kg/m ³)
Diamètre de mobilité moyen [nm]	6
Ecart-type géométrique [-]	1,6

produites par le générateur sont sphériques, ce qui permet de s'affranchir des effets dus à la morphologie des agrégats.

3.3. Colmatage

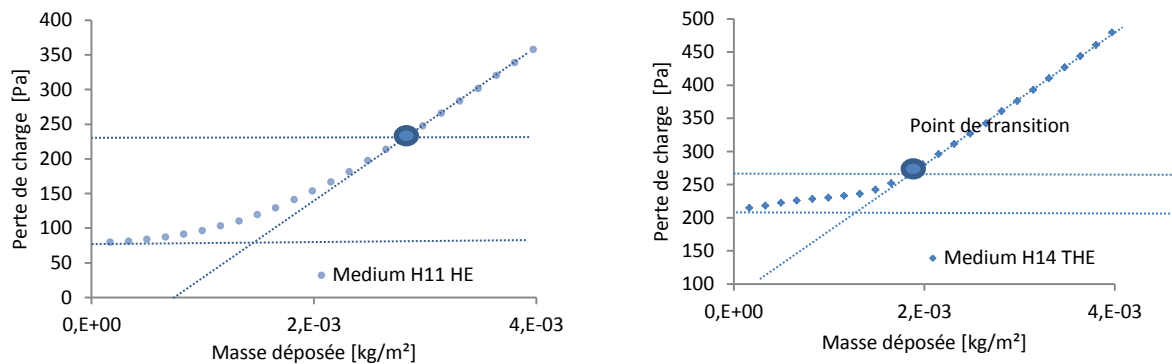


Figure 5: courbes de colmatage des media H11 et H14 pour des aérosols d'argent

La figure 5 représente les courbes de colmatage pour les media testés avec les aérosols nanométriques d'argent. Le point de transition caractérise le début de la phase de filtration en surface qui succède à la phase de filtration en profondeur. Nous le considérerons comme le début de la croissance linéaire de la perte de charge. Plusieurs points sont à remarquer :

- la perte de charge du medium vierge est différente pour les deux media ;
- la phase de filtration en surface présente une augmentation de perte de charge identique pour les deux media, compte tenu d'un aérosol de colmatage identique ;
- la durée de la filtration profonde est plus longue dans le cas du medium H11, en raison de l'efficacité intrinsèque des media qui engendre des profils de pénétration différents (Cf. 3.4) ;
- la différence entre la perte de charge du medium vierge et celle atteinte au point de transition est plus importante pour le medium H11, ce qui est conforme au fait que la masse déposée au sein du filtre est plus importante.

3.4. Profil de pénétration

Le profil de pénétration, qui conditionne la perte de charge dans les premiers instants de la filtration, présente ici deux profils distincts (figure 6 et figure 7 représentant respectivement la cartographie des éléments dans une tranche et les répartitions pour les deux media étudiés). Dans le medium H14, les particules s'accumulent à la surface du medium, essentiellement dans les 40 premiers micromètres. Le medium H11 présente un profil beaucoup plus réparti (figure 7).

Ces premières mesures sont en accord avec l'augmentation de perte de charge observée précédemment au point de transition, qui est significativement plus importante pour le medium H11 (figure 5). En effet, le medium ayant accumulé plus de particules en son sein, sa résistance aéraulique s'en trouve nettement plus affectée. De plus, la faible pénétration des aérosols au sein du medium H14 engendre une transition plus rapide vers la filtration en surface.

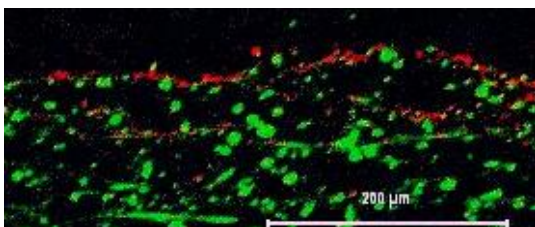


Figure 6 : cartographie de la surface d'un filtre colmaté (MEB-EDX) ; en rouge l'argent des particules, en vert le silicium des fibres (filtre H11)

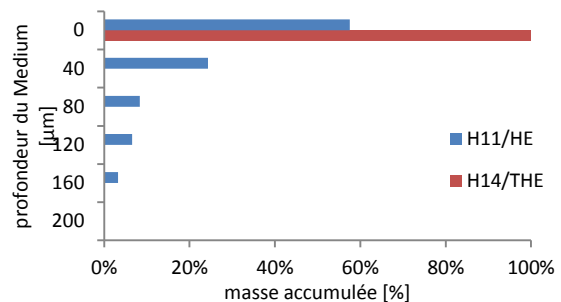


Figure 7 : profil de pénétration d'un aérosol d'argent dans un medium H11 et H14

4. Prédiction du point de transition

En reprenant les approches de Japuntich et Thomas (Japuntich et al. 1995, Thomas 2001), qui considèrent une masse critique accumulée dans la première couche du medium, assurant ainsi la croissance du gâteau, nous introduisons la notion de pénétration de l'aérosol au sein du medium. En effet, cette pénétration peut faire varier du simple au double la masse critique de transition entre les phases de filtration profonde et en surface (près de 100% de la masse totale accumulée dans la première couche du medium THE contre moins de 60% pour le medium HE).

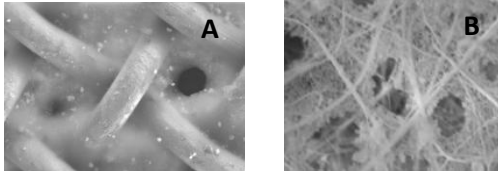


Figure 8 : images MEB d'une grille (A) et d'un filtre (B) lors de la filtration profonde

A l'heure actuelle, les modèles les plus précis rendant compte du comportement d'un medium fibreux considèrent le profil de pénétration pour l'évolution de la perte de charge durant la filtration profonde (Letourneau et al. 1992). Ils considèrent toutefois une accumulation dendritique des particules (Bergman et al. 1976). Sur la base d'observations microscopiques (figure 8), notre choix est de considérer un dépôt de porosité fixe et de

faire varier le volume occupé par ce dépôt.

Dans la suite, certaines hypothèses ont été formulées :

- le dépôt au sein du medium et dans les pores superficiels est considéré comme identique au gâteau de filtration (compacité α_g) ;
- le medium est considéré homogène et de compacité α_f .

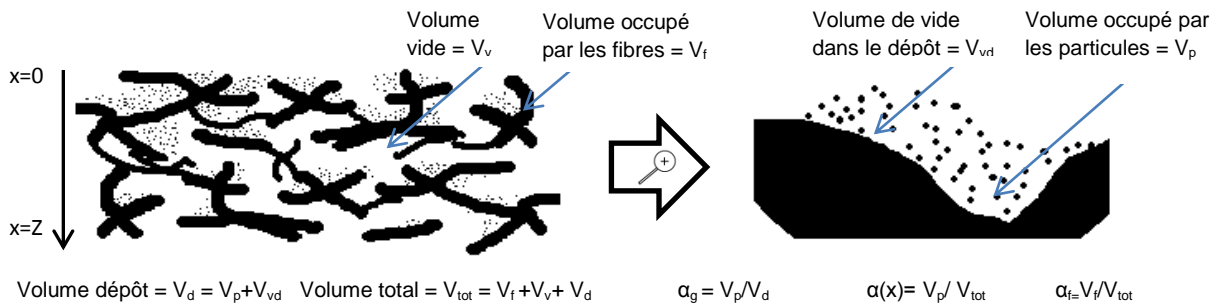


Figure 9 : illustration de la configuration du modèle

Au cours du colmatage, les particules s'accumulent au sein du medium selon un profil exponentiel. Le fait que les particules s'accumulent en profondeur, joue un rôle sur la masse collectée par le filtre durant la filtration profonde. L'expression de Letourneau (Letourneau et al. 1992) permet de caractériser la forme de ce profil :

$$\alpha(x) = \frac{m}{S_f} \cdot \frac{ke^{-kx}}{\rho \cdot (1 - e^{-kZ})} \quad [1]$$

avec k le facteur de pénétration, Z l'épaisseur du medium, $\alpha(x)$ la fraction volumique de particules à une profondeur x donnée, m la masse déposée et S_f la surface du medium. La fraction de volume occupée par les fibres et le dépôt (figure 9), constitué de particules et de vide, pour une profondeur x donnée s'exprime donc :

$$\alpha_{tot} = \alpha_f + \frac{\alpha(x)}{\alpha_g} \quad [2]$$

la formation d'un gâteau débute lorsque le dépôt occupe tout le volume vide et donc lorsque α_{tot} atteint la valeur 1.

On a donc pour m_{Cp} , la masse atteinte lors du début de la phase de filtration en surface ($x=0$) :

$$m_{Cp} = \frac{S_f \cdot \alpha_g \cdot \rho \cdot (1 - e^{-kZ}) \cdot (1 - \alpha_f)}{k} \quad [3]$$

Les valeurs calculées et mesurées sont regroupées dans le tableau 3 avec les paramètres issus du tableau 4.

Tableau 3 : masses relevées et calculées au point de transition

	m_{cp} [kg/m ²] calculée	m_{cp} [kg/m ²] Expérience
Medium H14	$2,58.10^{-3}$	$1,85.10^{-3}$
Medium H11	$6,54.10^{-3}$	$2,90.10^{-3}$

Tableau 4 : paramètres d'entrée du modèle

	Medium H14	Medium H11
compacité filtre [-]	0,078	0,065
épaisseur Z [µm]	450	420
Surface de filtration S_f [m ²]	1	
facteur k [m ⁻¹]	150000	60000
masse volumique des particules [kg/m ³]	10490	
compacité dépôt (Mädler et al. 2006) [-]	0,04	

5. Conclusion et perspectives

Les valeurs calculées sont proches de celles mesurées en comparaison avec les modèles existants. On observe toutefois une erreur plus importante dans la prédiction de la masse pour le medium H11 que pour le medium H14. Ce modèle reste donc à confronter à des données expérimentales plus nombreuses.

La valeur du coefficient k a ici été estimée à partir des mesures de profil. Cette valeur, dépendant de l'efficacité de collecte du medium, peut être théoriquement calculée à partir d'un modèle d'efficacité (Letourneau et al. 1992). Toutefois, dans le cas de particules nanométriques, les modèles donnent des efficacités très élevées (proches de 100%) et il est donc difficile d'obtenir un coefficient fiable.

Un modèle de colmatage peut se baser sur cette représentation et rendre compte de l'évolution de perte de charge d'un filtre plan en utilisant les modèles de perte de charge de Poiseuille et Novick (Novick et al. 1992). Des travaux sont en cours à l'IRSN sur cette approche.

6. Références

- Berner, D., Régniera, R., Morelea, Y., Gripparia, F., Appert-collin, J.-C., Thomas, D., (2013) Study of clogging and cleaning cycles of a pleated cartridge filter used in a thermal spraying process to filter ultrafine particles. *Powder technology* 234, pp. 1-6.
- Bergman, W., Taylor, R.D., Miller, A.H., Bierman, A.H., Herbard, H.D., Daarozza, R.A., Lum, B.Y., (1976) Enhanced filtration program at LLL – Progress report; Lawrence Livermore Laboratory, Livermore California.
- Japuntich, D.A., Stenhouse, J.I.T., Liu, B.Y.H., (1995) Effective pore diameter and monodisperse particle clogging of fibrous Filters. *Journal of Aerosol Science* 28 (1) , pp. 147-158.
- Letourneau, P., Mucley, Ph., Vendel, J., (1992) Effects of the particle penetration inside the filter medium on the HEPA filter pressure drop. *21st DOE/NRC nuclear air cleaning conference*.
- Mädler, L., Lall, A.A., Friedlander, S.K., (2006) One step aerosol synthesis of nanoparticle agglomerate films: simulation of film porosity and thickness. *Nanotechnology* 17 (19), art. no. 001, pp. 4783-4795.
- Novick, V.J., Monson, P.R., Ellison, P.E., (1992) The effect of solid particle mass loading on the pressure drop of HEPA filters. *Journal of Aerosol Sci.*, Vol. 23, No. 6, pp. 657-665.
- Schmidt, E., (1990) Preparation of Dust cakes for microscopic examination. *Powder technology* 60, pp. 173-177.
- Thomas, D., (2001) Etude de la filtration des aérosols par des filtres à fibre, Institut Polytechnique de Lorraine, Habilitation à diriger les recherches.