



HAL
open science

Incidence des effets électrostatiques sur les performances de filtration des nanoparticules

Dominique Thomas, Guillaume Mouret, Sandrine Chazelet, Denis Bemer

► To cite this version:

Dominique Thomas, Guillaume Mouret, Sandrine Chazelet, Denis Bemer. Incidence des effets électrostatiques sur les performances de filtration des nanoparticules. 27ème Congrès Français sur les Aérosols, Jan 2012, Paris, France. hal-00873002

HAL Id: hal-00873002

<https://hal.science/hal-00873002>

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.

INCIDENCE DES EFFETS ELECTROSTATIQUES SUR LES PERFORMANCES DE FILTRATION DES NANOPARTICULES

D. Thomas (1), G. Mouret (1,2), S. Chazelet (1,2), D. Bemer (2)

(1) Université de Lorraine –CNRS / Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP),
1 rue Grandville, BP 20451, 54001 Nancy

(2) Institut National de Recherche et de Sécurité, rue du Morvan, CS 60027, 54519 Vandoeuvre
Dominique.Thomas@ensic.inpl-nancy.fr

TITLE

Impact of Electrostatic Effects on Nanoparticle Filtration Efficiency

ABSTRACT

This study of charged or neutral nanoparticle penetration through variable fibre-type meshes revealed that, while the penetrations measured for stainless steel meshes do indeed obey the Brownian capture expression of Cheng and Yeh (1980), those obtained for polymer fibres widely deviate from this law. An analysis of the mechanisms for charged or globally neutral aerosol collection based on electrostatic forces provides an explanation for these deviations and allows us to propose a penetration model based on fibre charge for these dielectric screens. Furthermore, considering the charge distribution within an aerosol at Boltzmann equilibrium allowed us to model the penetration of these media to mainly neutral nanometric aerosols, which behave differently from particles carrying no charge.

RESUME

L'étude de la perméance de nanoparticules chargées ou non vis-à-vis de media de nature différente a mis en évidence que si les valeurs mesurées de perméance de grilles inox suivent bien la loi de capture par diffusion brownienne de Cheng et Yeh (1980), celles obtenues pour les fibres polymères s'en écartent fortement. L'analyse des mécanismes de capture par des nanoparticules des forces électrostatiques permet d'expliquer ces écarts et de proposer un modèle de perméance des médias diélectriques reposant sur la charge des fibres. Par ailleurs la prise en compte de la distribution de charges au sein d'un aérosol à l'équilibre de Boltzmann a permis de modéliser la perméance de ces médias vis-à-vis d'aérosol nanométriques globalement neutres qui se comportent différemment de particules ne portant aucune charge.

1. Introduction

Dans le cas de la filtration de nanoparticules par des grilles ou des filtres à fibres, la perméance est définie par :

$$P = \exp \left[-4 \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \frac{Z}{\pi d_f} \eta \right] \quad (\text{éq 1})$$

Avec α la compacité, d_f le diamètre des fibres, Z épaisseur de la grille ou du filtre, η l'efficacité unitaire de collection. En l'absence de forces électrostatiques et dans le domaine nanométrique la diffusion brownienne reste le mécanisme prépondérant. L'efficacité unitaire par diffusion est donnée par la relation de Kirsch et Fuchs (1968), validée par Cheng et Yeh (1980) dans le domaine nanométrique.

$$\eta = 2.7 Pe^{-2/3} \quad (\text{éq 2})$$

où Pe est le nombre de Péclet défini par $\frac{d_f \cdot U_f}{D}$ avec U_f , vitesse de filtration (m/s) ; d_f , diamètre des fibres (m) et D , coefficient de diffusion des particules (m^2/s)

$$D = \frac{kTCu}{3\pi\mu_g d_p} \quad (\text{éq 3})$$

k , la constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$) ; T , la température de l'air (K) ; μ_g , la viscosité dynamique de l'air (Pa.s) ; d_p , le diamètre des particules (m) ; Cu , le Coefficient de Cunningham donné par

$$Cu = 1 + \frac{2\lambda_g}{d_p} \cdot \left[a + b \cdot \exp\left(-c \frac{d_p}{2 \cdot \lambda_g}\right) \right] \quad (\text{éq 4})$$

Avec $a = 1,165$; $b=0,483$; $c= 0,997$ (Kim et al (2005)) et λ_g libre parcours moyen de l'air (66,4 nm à 20°C et sous la pression atmosphérique)

Si les fibres ou les particules, voire les deux, sont porteuses de charges, des forces électrostatiques peuvent influencer sur l'efficacité de filtration. Ces forces sont nommées :

- force image si la particule est chargée et la fibre neutre
- force de polarisation si la fibre est chargée et la particule neutre
- force coulombienne si la fibre et la particule sont chargées

De telles forces sont notamment mises à profit dans le cas des filtres électrets dont les fibres, généralement en polymère, possèdent une distribution de charges électrostatiques, améliorant très significativement l'efficacité du média (du moins tant que les fibres sont chargées) sans en augmenter la perte de charge, autrement dit la « consommation énergétique ». L'efficacité unitaire de fibre $\eta_{\text{élec}}$, dépendant de nombres adimensionnels, peut être définie pour chacune des trois forces (tableau 1).

Tableau 1. Expressions de l'efficacité unitaire de collecte par effets électrostatiques $\eta_{\text{élec}}$

Auteurs	$\eta_{\text{élec}}$	nombre adimensionnel
<i>particules chargées / fibres neutres (forces image)</i>		
Lundgren et Whitby (1965)	$\eta_{0q} = 1,5 N_{0q}^{1/2}$	$N_{0q} = \left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1} \right) \frac{q^2 Cu}{12 \pi^2 \mu_g U_f \epsilon_0 d_p d_f^2}$
Yoshioka et al. (1968)	$\eta_{0q} = 2,3 N_{0q}^{1/2}$	
Alonso et al (2007)	$\eta_{0q} = 9,7 N_{0q}^{1/2}$	
<i>particules neutres / fibres chargées (forces de polarisation)</i>		
Stenhouse (1974)	$\eta_{q0} = 0,84 N_{q0}^{0,75}$	$N_{q0} = \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \frac{\lambda^2 d_p^2 Cu}{3 \pi^2 \mu_g U_f \epsilon_0 d_f^3}$
Kraemer et Johnstone (1955)	$\eta_{q0} = \left(\frac{3 \pi}{2} \right)^{1/3} N_{q0}^{0,75}$	
<i>particules chargées / fibres chargées (forces coulombiennes)</i>		
Kraemer et Johnstone (1955)	$\eta_{qq} = \pi N_{qq}$	$N_{qq} = \frac{\lambda q Cu}{3 \pi^2 \mu_g U_f \epsilon_0 d_p d_f} = \lambda \cdot \frac{Z_p}{U_f \epsilon_0 d_f}$

ϵ_f et ϵ_p sont respectivement les constantes diélectriques de la fibre et de la particule, ϵ_0 est la permittivité du vide ($8,84 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$), Z_p la mobilité électrique des particules ($\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) et q est la charge portée par la particule : $q = N \times e$ (éq 5)

Avec N , le nombre de charges élémentaires e ($1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$) portées par la particule.

La difficulté majeure dans l'utilisation des expressions de Stenhouse (1974) et Kraemer et Johnstone (1955) réside dans la détermination de la charge linéique des fibres λ (en C.m^{-1}).

2. Description des médias filtrants testés et de l'installation MEFIANCE

2.1 Propriétés des médias filtrants

Les médias testés au cours de cette étude sont de simples grilles, en acier inox ou matières synthétiques, dont les caractéristiques physiques sont rassemblées dans le tableau 2. Compte tenu de la rigidité des fils, l'épaisseur des grilles en acier inox a été prise égale à deux fois leur diamètre de fibres. Pour les grilles en polyamide et ETFE en revanche, plus souples et « compressibles », Z est prise égale à 1,5 fois le diamètre de fibres.

Tableau 2. Caractéristiques géométriques des grilles testées

nom du média	inox 355	inox 150	inox 75	inox 40	inox 25	nylon 75	fluortex 150
matériau	acier inox 316					polyamide	ETFE*
diamètre de fibres d_f (μm)	200	100	50	36	25	75	105
ouverture de maille ω (μm)	355	150	75	40	25	75	150
épaisseur Z (μm)	400	200	100	72	50	112,5	157,5
compacité α	0.28	0.31	0.31	0.37	0.39	0.39	0.32

*éthylène tétrafluoroéthylène

2.2 Banc d'essais MEFIANCE

Le banc d'essais MEFIANCE (Mesure de l'Efficacité des Filtres vis-à-vis des Aérosols Nanométriques Chargés ou Electriquement Neutres) représenté sur la figure 1 (Mouret, 2011) permet de générer des aérosols à l'aide d'un générateur Palas GFC-1000 à l'équilibre de Boltzmann (aérosol globalement neutre) et des aérosols mono-chargés d'oxyde de cuivre ou de carbone.

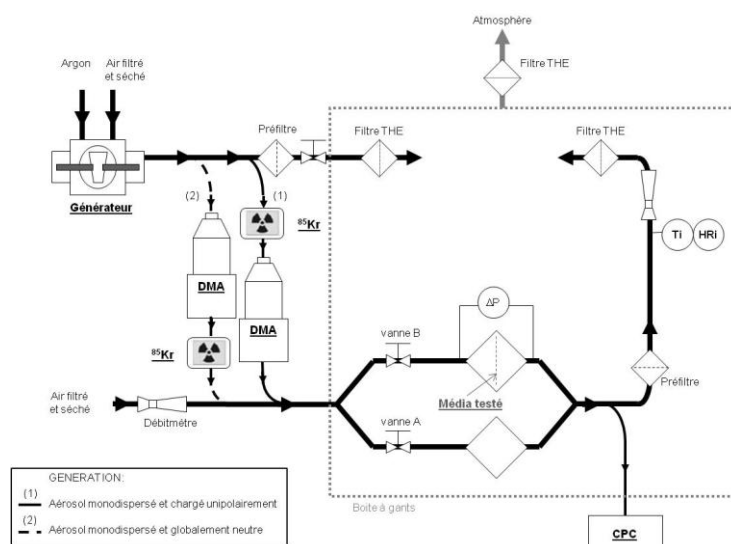


Figure 1. Schéma du banc d'essais MEFIANCE

Un aérosol monochargé (+ ou -) est obtenu en sélectionnant par le nano-DMA une taille de particules de l'aérosol généré préalablement mis à l'équilibre de Boltzmann, (voie 1, figure 1) Pour obtenir un aérosol monodispersé globalement neutre, une partie des particules générées par le GFG-1000 naturellement porteuse de charge, positive ou négative est d'abord sélectionnée puis neutralisée par la source ^{85}Kr (voie 2, figure 1). Le couplage du nano-DMA avec un SMPS (TSI) a démontré qu'un seul et unique diamètre était bien sélectionné par le nano-DMA sans neutralisation préalable et non un spectre granulométrique de particules présentant la même mobilité électrique et porteuses d'un nombre différent de charges. Les aérosols produits sont ensuite filtrés sur la grille test.

3. Résultats

3.1 Cas des grilles inox

L'accord entre les valeurs expérimentales des perméances obtenues pour les cinq grilles inox (à des vitesses de filtration de 5, 10 et 15 cm.s⁻¹) dans le cas d'aérosols de cuivre à l'équilibre de Boltzmann ou mono-chargés et le modèle de Cheng et Yeh (1980) est globalement satisfaisant. Ce résultat conforte les travaux de Alonso et al. (1997) et Heim et al. (2005), qui ont testé le même type de médias, pour des particules d'argent et de NaCl.

3.1 Cas des grilles synthétiques

2.1. Aérosol chargé

La figure 2 présente les perméances mesurées pour des particules de cuivre monochargées positivement ou négativement, au travers de la grille nylon 75. Les résultats obtenus pour des aérosols à l'équilibre de Boltzmann, sont également tracés à titre de comparaison.

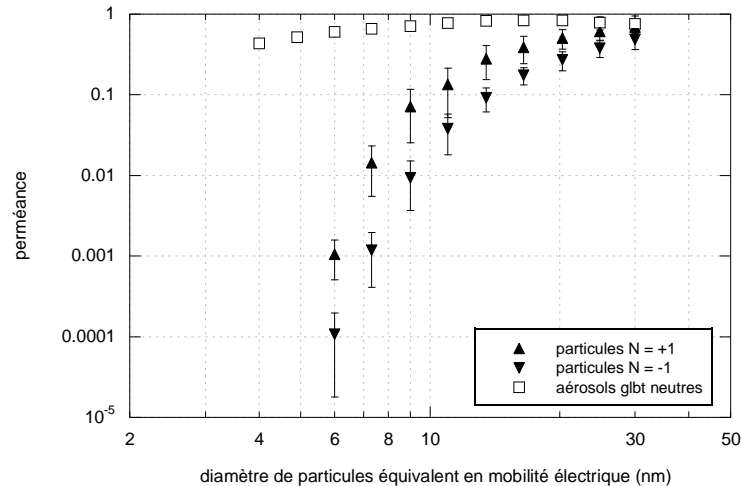


Figure 2. Influence de l'état de charge des particules de cuivre sur leur perméance au travers de la grille nylon 75, à 5 cm.s⁻¹

Il apparaît clairement que la grille est beaucoup plus efficace dans le cas d'aérosols chargés. La différence de perméance entre particules chargées et l'aérosol globalement neutre croît de manière spectaculaire avec la diminution du diamètre des particules. Ce résultat laisse à penser qu'intervient ici la force coulombienne. Autrement dit, la grille serait chargée, qui plus est bipolairement compte tenu des perméances observées pour des particules chargées positivement ou négativement. A noter que les essais réalisés avec la grille fluortex 150 aboutissent au même constat.

Cette hypothèse peut être validée par la représentation de l'efficacité unitaire globale vis-à-vis des particules monochargées, $\eta_{exp,|N|=1}$, déduite des valeurs expérimentales de la perméance des filtres suivant l'équation 1, en fonction de l'efficacité unitaire de collecte par diffusion brownienne η_d calculée théoriquement à partir de Cheng et Yeh (1980). $\eta_{exp,|N|=1}$ est largement supérieure à η_d dans tous les cas (d'environ un facteur 20 pour la grille nylon 75, et 80 pour la grille fluortex 150). Le mécanisme de diffusion brownienne peut donc bien être négligée devant les forces coulombiennes de sorte que $\eta_{exp,|N|=1} = \eta_{qq,|N|=1}$.

A partir de l'expression de Kraemer et Johnstone (1955), il vient donc:

$$\eta_{exp,|N|=1} = \lambda \frac{Z_p}{U_f \epsilon_0 d_f} \quad (\text{éq 6})$$

Ainsi, pour la grille nylon 75, $\lambda^+ = 4,34 \times 10^{-11} \text{ C.m}^{-1}$ et $\lambda^- = 2,94 \times 10^{-11} \text{ C.m}^{-1}$ et pour la grille fluortex 150, $\lambda^+ = \lambda^- = 3,06 \times 10^{-10} \text{ C.m}^{-1}$. Ce qui conduit à des densités de charge surfaciques

($\sigma = \frac{\lambda}{\pi d_f}$) pour la grille nylon 75 de $\sigma^+ \approx 1,84 \times 10^{-7} \text{ C.m}^{-2}$ et $\sigma^- \approx 1,24 \times 10^{-7} \text{ C.m}^{-2}$ et pour la

grille fluortex 150 de $\sigma \approx 9,28 \times 10^{-7} \text{ C.m}^{-2}$. L'ordre de grandeur trouvé est cohérent avec celui donné par Lowkis et Motyl (2001), pour des fibres de polypropylène (σ compris entre 10^{-6} et $2,5 \times 10^{-5} \text{ C.m}^{-2}$) volontairement chargées par décharge corona à 25 kV.

2.2. Aérosol globalement neutre

Avec les grilles nylon 75 et fluortex 150, le modèle de Cheng et Yeh a tendance à surestimer les valeurs de perméances expérimentales (figures 3 et 4) avec un aérosol globalement neutre. Si un accord satisfaisant peut être relevé en-dessous de 11 nm entre théorie classique et expérience, les perméances mesurées pour de plus grosses particules sont en revanche fortement inférieures aux valeurs prédites par le modèle de Cheng et Yeh (1980).

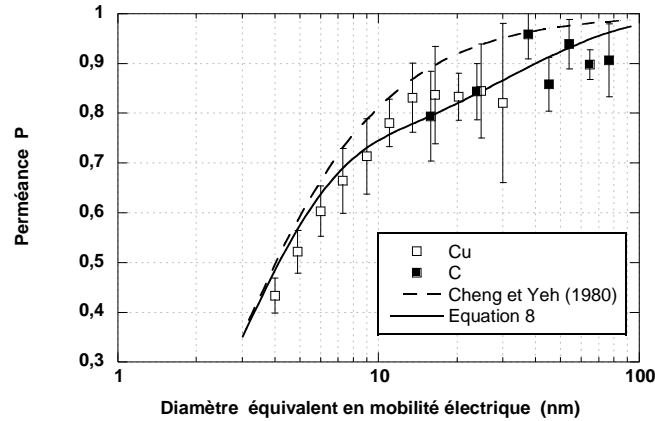


Figure 3. Perméance d'aérosols de cuivre ou de carbone globalement neutres au travers de la grille nylon 75, à 5 cm.s^{-1}

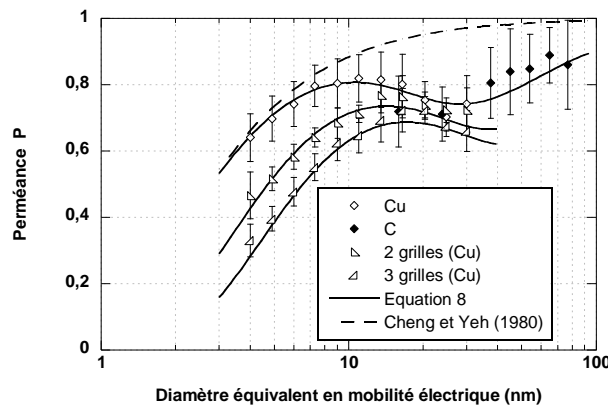


Figure 4. Perméance d'aérosols de cuivre ou de carbone globalement neutres au travers de la grille fluortex 150, à 5 cm.s^{-1}

La grille fluortex 150 affiche en outre un étonnant maximum local aux alentours de 10 nm, et un minimum local entre 20 et 40 nm. Au-dessus de 10 nm, la perméance expérimentale diminue lorsque le diamètre de particules augmente, puis remonte de nouveau progressivement au-delà de 25 nm. Cette situation n'est pas due à la nature chimique des aérosols, puisque dans la zone de diamètres où les deux spectres se recouvrent, les grilles affichent la même perméance (à 16 et 25 nm notamment), que les particules soient de cuivre ou de carbone.

Ce comportement peut s'expliquer par la présence de particules chargées au sein de l'aérosol-test. En effet, l'aérosol en sortie de source ^{85}Kr est globalement neutre, mais une partie des particules est néanmoins porteuse de charges. Les charges (+) et (-) étant sensiblement réparties en proportions égales, on aboutit à une neutralité électrique globale (équilibre de Boltzmann), mais l'aérosol est constitué par un « mélange » de particules positives, négatives et non-chargées, dont les proportions respectives $g(N)$ dépendant du diamètre d_p peuvent être estimées par les équations de Wiedensholer (1988). Dès lors, en supposant que la collecte de chaque « type » de particules est indépendante l'une de l'autre, nous pouvons écrire :

$$P = \sum_{N=-2}^2 [g(N) \times P(N)] \quad (\text{éq 7})$$

Soit

$$P = g(0) \times \exp\left(-2,7Pe^{-2/3} \frac{4\alpha}{(1-\alpha)} \frac{Z}{\pi d_f}\right) + g(1) \times \exp\left(-4 \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \frac{Z}{\pi d_f} \eta_{q,q,(N=1)}\right) + g(-1) \times \exp\left(-4 \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \frac{Z}{\pi d_f} \eta_{q,q,(N=-1)}\right) + g(2) \times \exp\left(-4 \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \frac{Z}{\pi d_f} \eta_{q,q,(N=2)}\right) + g(-2) \times \exp\left(-4 \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \frac{Z}{\pi d_f} \eta_{q,q,(N=-2)}\right)$$

(éq 8)

Les fibres étant chargées (selon une densité λ), l'éventualité de forces de polarisation intervenant dans la capture des particules 0-chargées de l'aérosol ne doit pas être exclue. Cependant les valeurs théoriques de η_{q0} (tableau 1) calculées à partir de l'expression de Kraemer et Johnstone (1955) restent très inférieures à η_d , quels que soient la grille ou le diamètre de particules considéré (facteur 60 entre les 2 termes au minimum). La considération de la seule diffusion brownienne pour la fraction non-chargée $g(0)$ des aérosols globalement neutres est donc correcte. Notons que la prise en compte des particules chargées dans le calcul de la perméance (l'équation 8) traduit bien l'évolution des valeurs expérimentales (figures 3 et 4).

CONCLUSION

Cette étude a mis en évidence le rôle important que peuvent jouer les forces électrostatiques et en particulier la force Coulombienne dans la collecte des particules nanométriques par des médias diélectriques même pour un aérosol globalement neutre. Dans le cas des grilles métalliques, le modèle de Cheng et Yeh (1980) est utilisable pour n'importe quelle nature d'aérosol. Pour les grilles synthétiques, la force coulombienne intervient dans la capture des particules chargées, et abaisse la perméance globale des aérosols à l'équilibre de Boltzmann, pour lesquels il convient de tenir compte des mécanismes prenant place pour chaque fraction $g(N)$ de particules.

Par ailleurs la méthodologie employée pour la détermination indirecte des densités de charge linéique basée sur la mesure de la perméance expérimentale du média filtrant s'avère intéressante et pourrait facilement être transposée aux médias fibreux à fibres chargées électriquement, dits filtres électrets, utilisés notamment en protection respiratoire. La connaissance de ce paramètre obtenu à partir d'essais ciblés mettant en œuvre des nanoparticules monochargées permettrait de prédire le comportement de ces filtres électrets vis-à-vis d'aérosols présentant une distribution de charge.

Références

- Alonso, M., Alguacil, F. J., Santos, J. P., Jidenko, N. et Borra, J. P. (2007). Deposition of Ultrafine Aerosol Particles on Wire Screens by Simultaneous Diffusion and Image Force, *Journal of Aerosol Science*, 38, 1230-1239
- Alonso, M., Kousaka, Y., Hashimoto, T. et Hashimoto, N. (1997). Penetration of Nanometer-Sized Aerosol Particles through Wire Screen and Laminar Flow Tube, *Aerosol Science and Technology*, 27, 471-480.
- Cheng, Y. S. et Yeh, H. C. (1980). Theory of a Screen-Type Diffusion Battery, *Journal of Aerosol Science*, 11, 313-320.
- Heim, M., Mullins, B. J., Wild, M., Meyer, J. et Kasper, G. (2005). Filtration Efficiency of Aerosol Particles below 20 Nanometers, *Aerosol Science and Technology*, 39, 782-789.
- Kim J.H., Mulholland G.W., Kickuck S.R., Pui D.Y.H. (2005) Slip Correction measurements of certified PSL nanoparticles using a nanometer differential mobility analyzer (nano-DMA) for Knudsen number from 0,5 to 83, *Journal of Research of the National Institute of Standards and technology* 110(1), 31-54
- Kirsch A.A., Fuchs N.A. (1968) Studies on fibrous aerosol filters – III Diffusional deposition of aerosol in fibrous filters, *Ann. Occup. Hyg.* Vol 11, 299-304
- Kraemer, H. F. et Johnstone, H. F. (1955). Collecte of Aerosol Particles in presence of Electrostatic Fields, *Industrial and Engineering Chemistry*, 47, 2426-2434.
- Lowkis, B. et Motyl, E. (2001). Electret Properties of Polypropylene Fabrics, *Journal of Electrostatics*, 51-52, 232-238.
- Lundgren, D. A. et Whitby, K. T. (1965). Effect of a Particle Electrostatic Charge on Filtration by Fibrous Filters, *Industrial & Engineering Chemistry Process Design & Development*, 4, 345-349.
- Mouret G., Chazelet S., Thomas D., Bemer D. (2011) Discussion about the thermal rebound of nanoparticles, *Separation and Purification Technology*, 78, 125-131
- Stenhouse, J. I. T. (1974). The Influence of Electrostatic Forces in Fibrous Filtration, *Filtration and Separation*, 11, 25-26.
- Wiedensholer A. (1988). Technical note: an approximation of the bipolar charge distribution for particles in the submicron size range, *Journal of Aerosol Science*, 19, 387-389.
- Yoshioka, N., Emi, H. et Tamori, I. (1968). Effect of Electrostatic Force in the Filtration Efficiency of Aerosols, *Kagaku Kogaku*, 32, 815-820.