

- Aérosol
- Particule
- Charge électrique
- Mesure

► Denis BEMER, Sandrine CHAZELET,
Alain MASSON, Isabelle SUBRA,
Maria-Cécilia CADAVID-RODRIGUEZ,
INRS, département Ingénierie des procédés

MEASUREMENT AND INFLUENCE OF AEROSOL ELECTRICAL CHARGE

Most particles in aerosols generated under industrial conditions are electrically charged. The electrical forces created by these particles generally prevail, often by several orders of magnitude, over all the other forces present and therefore control the behaviour of aerosol during its conveyance. It is therefore important to consider this phenomenon in most areas involving aerosols: sampling, filtration and separation, conveyance in ventilated rooms, particle coagulation and deposition in the respiratory tract, powder explosiveness, filter weighing, etc. The study described in this paper involved determining the performance characteristics of particle electrical charge measuring systems for three different types of aerosol. Influence of the aerosol charge state was then studied in three areas: deposition in tubes used for sampling, deposition in MilliporeR-type plastic cassettes, which are frequently used for measuring inhalable and alveolar standardised concentrations and filtration by media. The tests conducted confirm that, in relation to sampling, the particle electrical charge can be the main cause of concentration and particle size measurement errors. In the aerosol filtration area, lack of control of this parameter can also cause errors in establishing performance characteristics.

- Aerosol
- Particle
- Electrical charge
- Measurement

CHARGE ÉLECTRIQUE DES AÉROSOLS MESURE ET INFLUENCE DE CE PARAMÈTRE

Les particules des aérosols générés en milieu industriel sont, pour la plupart, chargées électriquement. Les forces électriques générées par ces particules dominent généralement toutes les autres forces, souvent de plusieurs ordres de grandeur et contrôlent, de ce fait, le comportement de l'aérosol lors de son transport. Par conséquent, ce phénomène est important à prendre en compte dans la plupart des domaines impliquant les aérosols : échantillonnage, filtration et séparation, transport dans les locaux ventilés, coagulation des particules, dépôt dans les voies respiratoires, explosivité des poudres, pesée des filtres, etc. L'étude présentée dans cet article a consisté à déterminer les performances de trois dispositifs de mesure de la charge électrique des particules, pour différents types d'aérosols. L'influence de l'état de charge de l'aérosol était ensuite étudiée dans trois domaines : le dépôt dans les tubes servant à l'échantillonnage, le dépôt dans les cassettes plastiques de type Millipore[®], très utilisées pour la mesure des concentrations normalisées inhalables et alvéolaires, et la filtration par les médias. Les essais effectués confirment, qu'en matière d'échantillonnage, la charge électrique des particules peut être la cause principale des erreurs de mesure de la concentration et de la taille des particules. Dans le domaine de la filtration des aérosols, l'absence de maîtrise de ce paramètre peut être également source d'erreurs dans l'établissement des performances.

INTRODUCTION

Les particules des aérosols générés en milieu industriel sont pour la plupart chargées électriquement et parfois très fortement. Les forces électriques générées par ces particules chargées dominent généralement toutes les autres forces (gravité, diffusion, gradient thermique, etc.) souvent de plusieurs ordres de grandeur et contrôlent de ce fait le comportement de l'aérosol lors de son transport. La particule chargée est soumise à une force électrique qui la dirige vers les surfaces proches (parois d'un local, d'un conduit, d'un dis-

positif de prélèvement, une fibre d'un filtre, etc.) ou les autres particules qu'elles soient également chargées ou non. Ce phénomène est par conséquent important à prendre en compte dans la plupart des domaines impliquant les aérosols : échantillonnage [1, 2], filtration et séparation [3], transport dans les locaux ventilés [4], coagulation des particules [5], dépôt dans les voies respiratoires [6], explosivité des poudres [7], pesée des filtres, etc.

La charge d'une particule peut être négative ou positive, selon qu'elle porte un excès ou un déficit d'électrons. Il existe une limite maximum à la charge électrique d'une particule correspondant

à un nombre de charges élémentaires compris entre 10^5 et $5 \cdot 10^6$ pour une particule de $1 \mu\text{m}$ (cf. Figure 1a). Cette charge limite dépend de la taille et de la morphologie de la particule (cas des agglomérats, par exemple), de sa nature liquide ou solide, de sa polarisabilité (positive ou négative) [8, 9]. A l'opposé, il existe aussi une limite inférieure, correspondant à l'équilibre de Boltzmann, pour lequel l'aérosol est considéré comme étant globalement neutre (≈ 1 charge élémentaire, négative ou positive, à $1 \mu\text{m}$) (cf. Figure 1a).

Il existe différents mécanismes de charge des particules [8, 10] :

- l'électricité statique (générée lors de la séparation de la particule d'une surface) est un mécanisme très efficace de charge qui entre en jeu notamment dans les procédés de génération d'aérosols par voies liquide ou solide, et lors du transport en conduit des poussières [11]. La constante diélectrique du matériau constitutif des particules est un paramètre déterminant, ainsi que les paramètres environnementaux comme l'humidité de l'air et la turbulence de l'écoulement ;

- la charge par diffusion Brownienne des ions atmosphériques sur les particules de l'aérosol. Ce mécanisme est, quant à lui, très peu dépendant des propriétés électriques du matériau constitutif de la particule (permittivité électrique) ;

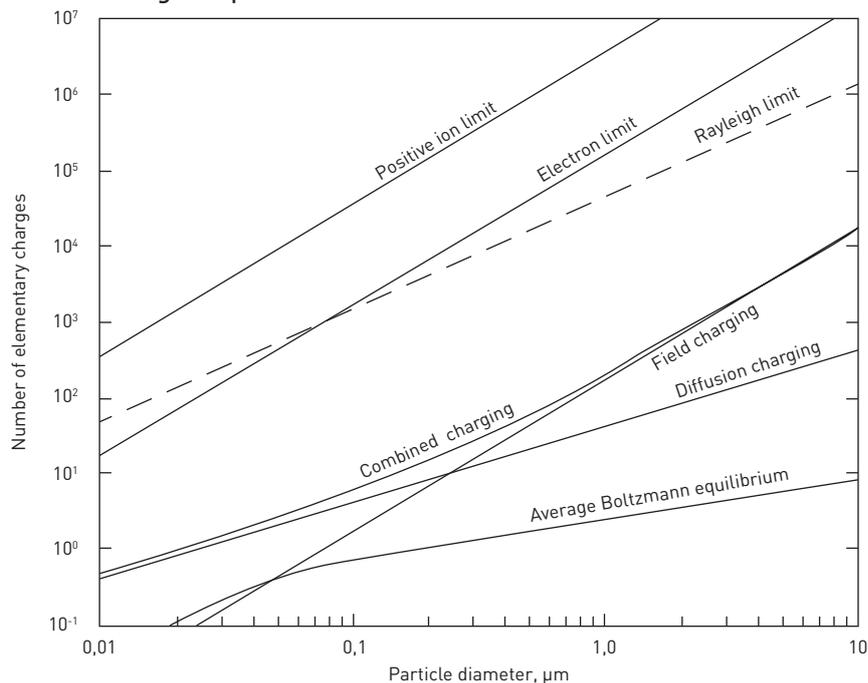
- la charge acquise par les particules du fait d'un champ électrique faisant migrer les ions produits par décharge couronne par exemple. Ce mécanisme dépend étroitement des propriétés électriques du matériau constitutif des particules.

Les mécanismes de charge par diffusion et par champ agissent souvent ensemble, c'est le cas par exemple, des chargeurs à effet couronne. Ces chargeurs sont constitués d'une ou plusieurs pointes métalliques alimentées par une haute tension, la plupart du temps continue, de quelques kV et balayées par un débit d'air. Les ions + ou - produits au voisinage de la pointe sont captés par les particules qui acquièrent ainsi une charge [12]. En dirigeant un flux d'ions + ou - vers l'aérosol, il est également possible de neutraliser au moins partiellement celui-ci. Il est par contre particulièrement difficile d'atteindre l'équilibre de Boltzmann à l'aide de ces dispositifs, à la différence des neutraliseurs utilisant une source radioactive.

L'étude, présentée dans cet article, a consisté à déterminer les performances de

FIGURE 1a

Limites de charge des particules



Limite de Rayleigh pour les liquides (eau dans l'exemple). Limites pour les solides (charge + et -). Limites pour les mécanismes de charge par diffusion (produit $C_n \cdot t = 10^{13} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$, C_n : concentration en nombre, t : temps de contact) et par champ ($E = 500 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$). Tiré de Hinds W.C. [8]

trois dispositifs de mesure de la charge électrique des particules, pour différents types d'aérosols. L'influence de l'état de charge de l'aérosol était ensuite étudiée dans trois domaines : le dépôt dans les tubes servant à l'échantillonnage (tubes en carbone, nylon et téflon), le dépôt dans les cassettes plastiques de type Millipore®, très utilisées pour la mesure des concentrations normalisées inhalables et alvéolaires, et la filtration par les médias (filtres à fibres chargées et neutres).

ÉTAT DE CHARGE DES AÉROSOLS

MÉTHODES ÉTUDIÉES

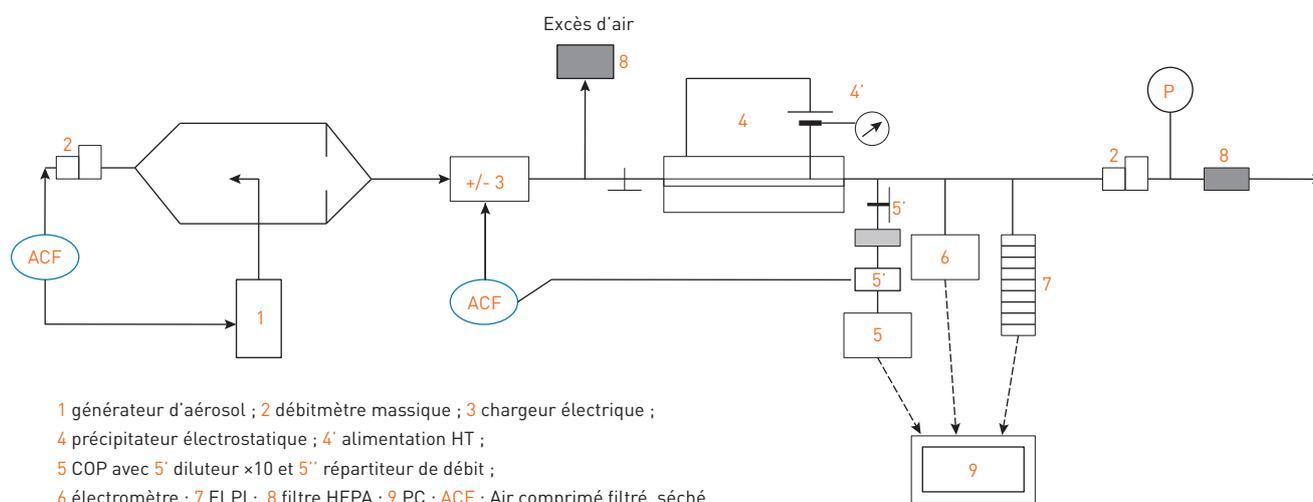
De nombreuses techniques de mesure ont été mises au point pour la mesure de la charge électrique des aérosols [13]. Trois dispositifs ont été sélectionnés et mis en œuvre pour mesurer la charge électrique d'un aérosol : un électromètre pour aérosol (aerosol electrometer 3068B, TSI), un impacteur basse pression (ELPI, Dekati) et un précipitateur électrostatique, mis au point au laboratoire, couplé à un granulo-

mètre. Le schéma du montage expérimental est décrit Figure 1b. Des aérosols salins (KCl ou NaCl), de polyvinyl-acétate (PVA) et de fluorescéine ont été générés par voie liquide (Palas AGK 2000). Un aérosol de carbone ultrafin a été produit au moyen d'un générateur à décharges électriques (Palas GFG 1000). Enfin, une poudre d'oxyde de zinc, récupérée dans la trémie d'un dépoussiéreur d'une cabine de métallisation à l'arc électrique, a été générée par voie sèche au moyen d'un générateur à brosse tournante (RBG 1000, Palas).

L'aérosol est transféré vers la zone de charge. Un chargeur à effet couronne (EAN 581, Topas) ainsi que le chargeur de l'impacteur ELPI, également à effet couronne, ont été testés. Dans le chargeur Topas, alimenté par de l'air comprimé, la charge électrique des particules est effectuée par introduction d'air ionisé (+ ou -) au niveau du flux d'aérosol. L'aérosol n'entre donc pas en contact avec les électrodes de charge. Par contre, dans le chargeur de l'ELPI, l'aérosol transite au voisinage direct de l'électrode de charge (+). Il pénètre ensuite dans le précipitateur, alimenté par une tension continue, stabilisée et positive, comprise entre 0 et 7,5 kV (au-delà la tension de claquage du dispositif est atteinte). Les particules non retenues

FIGURE 1b

Schéma du montage expérimental



par le précipitateur sont échantillonnées, isocinétiquement, et analysées au moyen d'un compteur optique (COP) (Lasair 1001 ou 310, PMS) couplé à un diluteur x 10 (VKL 10, Palas), un impacteur ELPI et un électromètre. Le débit traversant le précipitateur est mesuré au moyen d'un débitmètre massique.

Détermination via l'électromètre

L'électromètre permet de mesurer la charge nette de l'aérosol, c'est-à-dire l'excès de charges positives ou négatives portées par les particules. Celui-ci est prélevé sur un filtre disposé dans une cage de Faraday. Les particules collectées délivrent un courant qui est mesuré. Cet appareil permet de déterminer également la polarité de la charge électrique totale des particules collectées.

Détermination via l'ELPI

L'impacteur ELPI collecte les particules en fonction de leur taille aérodynamique sur 12 étages répartis de 28 nm à 10 µm. L'aérosol passe préalablement au travers d'un chargeur à effet couronne qui permet aux particules d'acquies une charge positive connue.

Les particules déposées sur les différents étages délivrent un courant, mesuré au moyen d'électromètres, à partir duquel on détermine le nombre de particules. En coupant l'alimentation électrique du chargeur corona de l'appareil ainsi que celle du piège à ions¹, il est possible de déterminer le courant délivré par les particules naturellement chargées. Dans le cas d'un aérosol à

charge bipolaire (+ et -), le courant, délivré à un étage considéré, est la résultante des courants correspondant aux particules positives et négatives qui ont été déposées. On mesure alors l'excès de charges + ou - des particules d'une taille donnée et non la contribution réelle des deux populations.

En réactivant le chargeur et le piège à ions on effectue la mesure dite « chargeur ON, piège ON » permettant de déterminer le nombre de particules en fonction de leur taille en se basant sur la loi de charge. La mesure « chargeur OFF, piège OFF » fournit le courant en fonction de la taille des particules d_p . On déduit le nombre de charges élémentaires par particule de ces deux mesures :

$$ne(d_p) = \frac{I(d_p)}{Cn(d_p) \cdot e \cdot Q} \quad (1)$$

avec I le courant (A), Cn la concentration en nombre (m^{-3}), e la charge élémentaire ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C) et Q le débit d'échantillonnage de l'impacteur ($m^3 \cdot s^{-1}$).

Ce système permet également de déterminer la polarité de la charge globale des particules déposées à chaque étage de l'appareil.

Détermination via la combinaison d'un précipitateur électrostatique et d'un compteur de particules

La troisième technique utilisée consiste en un précipitateur électrostatique couplé à un moyen de mesure de la distribution granulométrique de l'aérosol placé en sortie (cf. Figure 1b).

Les aérosols générés par voie liquide ont été mesurés au moyen de trois analyseurs : deux compteurs optiques (« Lasair 1001 » avec 8 canaux de 0,1 µm à 2 µm et « Lasair 310 » avec 8 canaux de 0,3 µm à 10 µm) et un analyseur de mobilité électrique (FMPS 3091, TSI) présentant 32 canaux de 6 nm à 0,5 µm.

La distribution granulométrique de la poudre d'oxyde de Zn à l'aval du précipitateur a été mesurée au moyen de l'impacteur ELPI, en raison des concentrations trop élevées pour les capacités des compteurs et de la nature des particules inadaptée à leur mesure par comptage optique. Compte tenu de la dimension nanométrique des particules de carbone, l'analyseur de mobilité électrique (FMPS 3091, TSI) a été retenu.

Le fonctionnement du précipitateur électrostatique repose sur l'application d'une tension continue (E) à l'électrode centrale, générant un champ électrique qui fait dériver les particules chargées et précipiter les plus mobiles d'entre elles sur les parois du dispositif. La fraction des particules piégées par le précipitateur varie avec la tension appliquée. Pour chaque diamètre de particules, la courbe de pénétration du précipitateur en fonction de la tension est établie. De cette courbe, on déduit la tension critique E_c (tension moyenne obtenue par l'intersection de la tangente à l'origine avec l'axe

¹ Précipitateur électrostatique inséré dans l'ELPI, à l'aval du chargeur, et dimensionné pour permettre l'élimination des petits ions produits.

des x) et la mobilité critique des particules ($m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$) [14] (cf. Annexe 1) :

$$Z_c(d_p) = \frac{Q_p}{2\pi \cdot L \cdot E_c(d_p)} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \quad (2)$$

avec Q_p le débit d'air traversant le précipitateur ($m^3 \cdot s^{-1}$), L la longueur de l'électrode (m), d_2 et d_1 les diamètres des électrodes externe et interne (m).

Le nombre de charge par particule (ne) de la mobilité critique Z_c est ainsi déduit :

$$ne(d_p) = \frac{3\pi \cdot \mu \cdot d_p \cdot Z_c(d_p)}{e \cdot \varphi} \quad (3)$$

avec μ la viscosité dynamique de l'air ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$), d_p le diamètre de particule (m), φ le coefficient de correction de Cunningham (s.d.).

Si ce système ne permet pas de définir la polarité de la charge des particules, il permet de déterminer la fraction des particules neutres fo (0 charge) en mesurant la concentration de l'aérosol à l'aval du précipitateur au maximum de la tension pouvant être appliquée, soit 7,5 kV. Ce système peut être également utilisé pour la génération d'un aérosol neutre. Dans le cas d'un aérosol bipolaire (à la différence de la méthode basée sur l'ELPI), le nombre de charges (ne) correspond aux particules + et - également éliminées par le précipitateur, sans qu'il soit possible de les distinguer ($ne_{\text{précipitateur}} \neq ne_{\text{ELPI}}$). Pour des particules mono-chargées, l'égalité $ne_{\text{précipitateur}} = ne_{\text{ELPI}}$ est théoriquement vérifiée.

RÉSULTATS

Différentes séries de mesures ont été entreprises avec des aérosols chargés artificiellement afin de comparer les méthodes.

PARTICULES CHARGÉES ARTIFICIELLEMENT

Comparaison précipitateur - ELPI

La Figure 2 représente le nombre de charges portées par les particules de KCl transitant par le chargeur Topas, établi au moyen des deux techniques (précipitateur/COP et ELPI)². En paral-

FIGURE 2

Nombre de charges élémentaires en fonction du diamètre aérodynamique des particules déterminé par précipitateur/compteur optique et méthode ELPI - Chargeur Topas + 7kV, 6 μ A - Particules de KCl

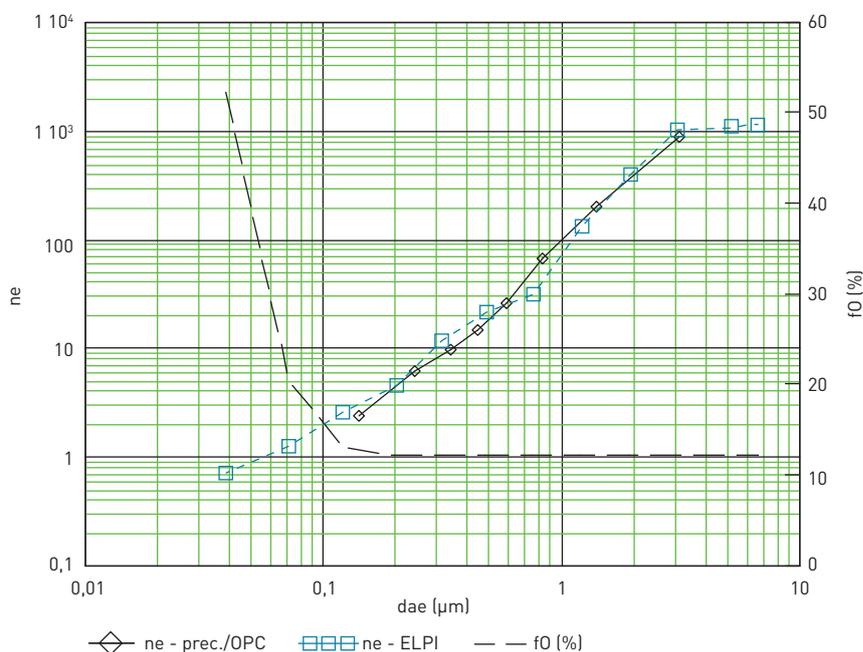
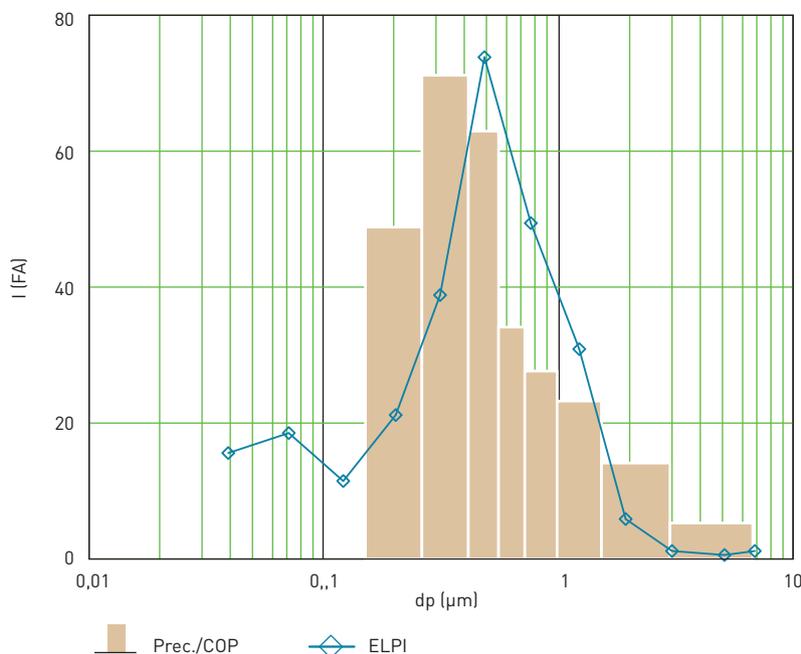


FIGURE 3

Distribution des courants en fonction du diamètre aérodynamique des particules déterminé par précipitateur/COP et l'ELPI - Chargeur Topas + 7kV, 6 μ A - Particules de KCl



lèle, la fraction de particules neutres (fo) est tracée en fonction de la taille des particules. La Figure 3 représente la distribution du courant en fonction de la taille des particules établie à partir des deux méthodes : précipitateur/COP (éq.1 inversée) et courants mesurés directement par l'ELPI.

² Afin de comparer les résultats obtenus avec les deux méthodes, le diamètre aérodynamique (dae) des particules de KCl a été calculé à partir du diamètre fourni par le COP (hypothèse 1 : diamètre optique = diamètre volumique) et la masse volumique des particules ($2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) (hypothèse 2 : particules sphériques). Le dae des particules est déterminé au moyen de l'ELPI.

Les mesures effectuées au moyen des deux techniques donnent des résultats très similaires.

Comparaison des lois de charge établies par la combinaison précipitateur/compteur et théorique

Cette expérience fait office de validation de la méthode basée sur la combinaison précipitateur électrostatique/compteur, la littérature fournissant précisément la loi de charge d'un aérosol en sortie du chargeur de l'ELPI [9].

Le nombre de charges portées par des particules de PVA, sortant du chargeur ELPI est représentée *Figure 4*. Le débit d'air transitant par le chargeur ELPI est égal à 12 l.min⁻¹ (débit nominal à 10 l.min⁻¹). La *Figure 4* montre le très bon accord entre les mesures et le calcul du nombre de charges théorique effectué aux conditions d'essai. Cet essai permet de valider la méthode de mesure et met également en évidence la très bonne efficacité de charge du chargeur ELPI par rapport au système Topas à courants équivalents. Les performances inférieures du chargeur Topas sont vraisemblablement dues à la dilution opérée par l'introduction d'air comprimé au sein du chargeur ainsi qu'au principe de charge (flux d'ions dirigé vers le flux de particules). La fraction des particules neutres (f_0) en sortie des deux chargeurs est nulle.

Comparaison des courants

Le courant total généré par l'aérosol est calculé à partir de la loi de charge établie au moyen du précipitateur électrostatique et de la concentration en nombre mesurée (équation 1 remaniée) :

$$I = e \cdot Q \cdot \sum_{i=1}^n ne_i \cdot Cn_i \quad (4)$$

avec n le nombre de canaux du granulomètre.

Un essai a été effectué en utilisant l'ELPI, à la fois pour le suivi de la concentration en fonction de la tension E , à la place du compteur optique (détermination de la charge ne par l'équation 3) et pour la mesure des courants (détermination de la charge ne par l'équation 1). La loi de charge ainsi établie est modélisée par $ne(d_p) = 53,7 \cdot d_p^{1,41}$. La *Figure 5* présente les courants mesurés et calculés. L'accord entre les deux est plutôt correct, avec toutefois une baisse plus importante du courant à 0,5 kV par rapport au

FIGURE 4

Etat de charge mesuré (précipitateur/COP) et théorique - Chargeur ELPI + 5kV, 1 μ A (12 l.min⁻¹) - Particules de PVA

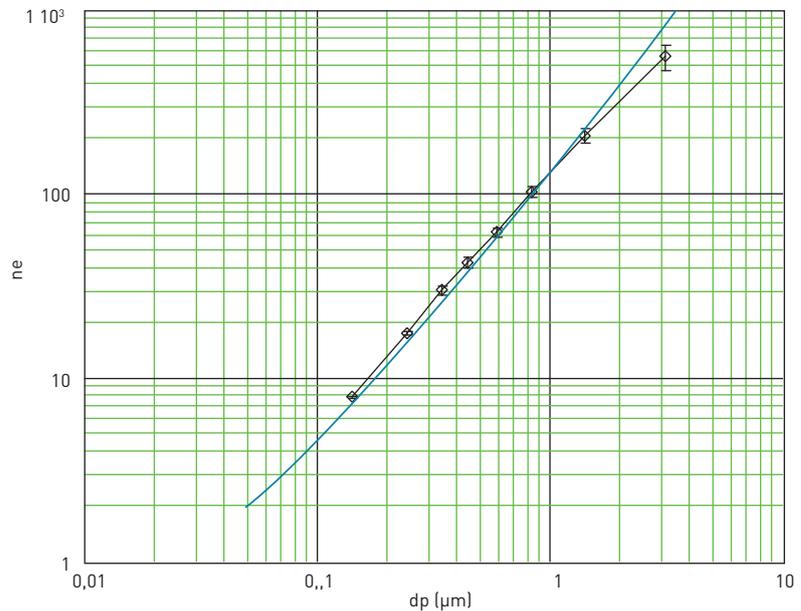
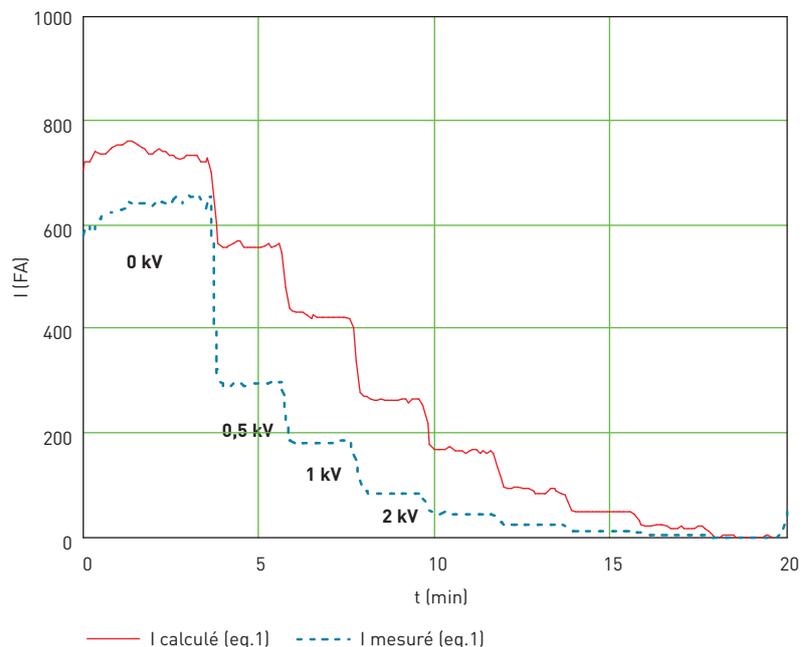


FIGURE 5

Total calculé (eq. 4 – Cn mesurée avec l'Elpi – trait plein) et mesuré (électromètre - pointillés). Particules de PVA chargées + (6 kV) 25 μ A, $Q_p = 16$ l.min⁻¹



courant calculé (ratio $I_{U=0}/I_{U=0,5 \text{ kV}}$). Cet effet non expliqué a été retrouvé à chaque essai. La *Figure 6* montre le bon accord obtenu cette fois entre les courants calculés (eq.1) et mesurés par l'ELPI.

CHARGE NATURELLE

La *Figure 7a* présente l'état de charge « naturelle » des particules de KCl, de PVA, de carbone et d'oxyde de Zn mesuré par la méthode du précipitateur. Les principales propriétés sont résumées dans le *Tableau I*.

Comme attendu, la charge portée par les particules est inférieure à celle déterminée après passage par les chargeurs Topas et ELPI, même si l'effet est moins marqué dans le cas du système Topas. Mais c'est surtout la fraction des particules neutres qui devient importante alors qu'elle était nulle en sortie des chargeurs. La *Figure 7b* présente la fraction des particules neutres de l'aérosol de carbone nano généré au moyen du dispositif à décharges électriques. Comme le prévoit la théorie, la fraction de particules neutres augmente lorsque le diamètre diminue.

On constate également que la polarité de la charge dépend à la fois de la nature des particules et du système de génération mis en œuvre.

Le *Tableau II* résume les possibilités offertes par les trois méthodes. Aucune de ces trois méthodes ne renseigne totalement sur l'état de charge, seule leur association permet une détermination complète.

Nous allons à présent examiner l'influence de la charge électrique d'un aérosol sur son comportement au travers de quelques exemples.

DÉPÔTS DANS LES TUBES ET CASSETTE PORTE-FILTRE

Le transport d'aérosols au moyen de tubes est un élément important de l'échantillonnage. Ces tubes fabriqués à partir de matériaux variés, plus ou moins bons conducteurs d'électricité, sont susceptibles de développer des charges à leur surface par tribo-électrification. Ce phénomène va avoir une incidence sur le dépôt des particules, également plus ou moins chargées, au cours de leur transport et affecter les caractéristiques de l'aérosol mesuré en termes de concentration et de distribution de tailles [1]. Ce problème concerne également d'autres éléments participant à l'échantillonnage des aérosols comme les cassettes porte-filtre de diamètre 37 mm de type MilliporeR, largement utilisées pour les mesures d'exposition sur les lieux de travail.

FIGURE 6

Courants mesurés (Elpi – trait plein) et calculés (eq.1 – Cn mesurée par Elpi) – particules de PVA chargées + (6 kV) 25 μ A, Qp = 16,4 l.min⁻¹

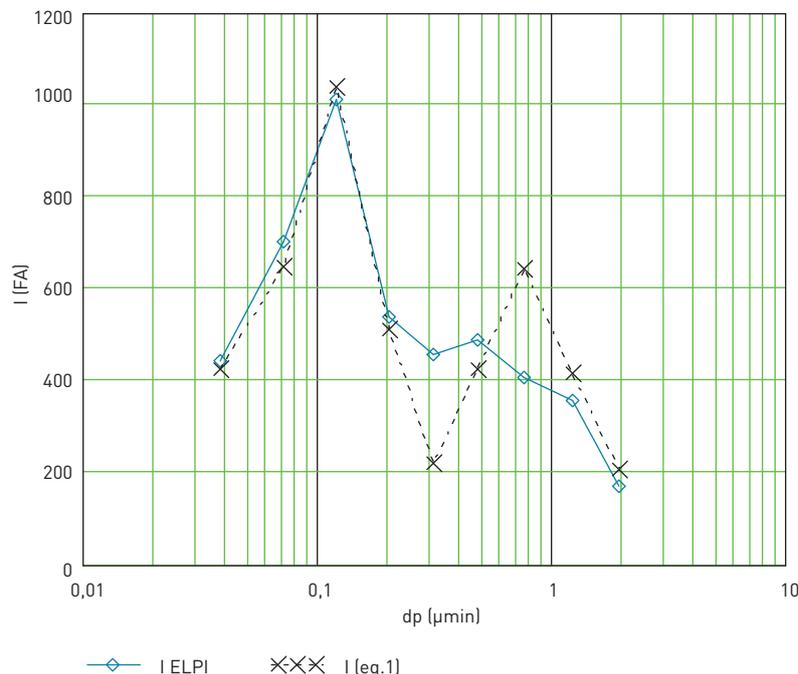
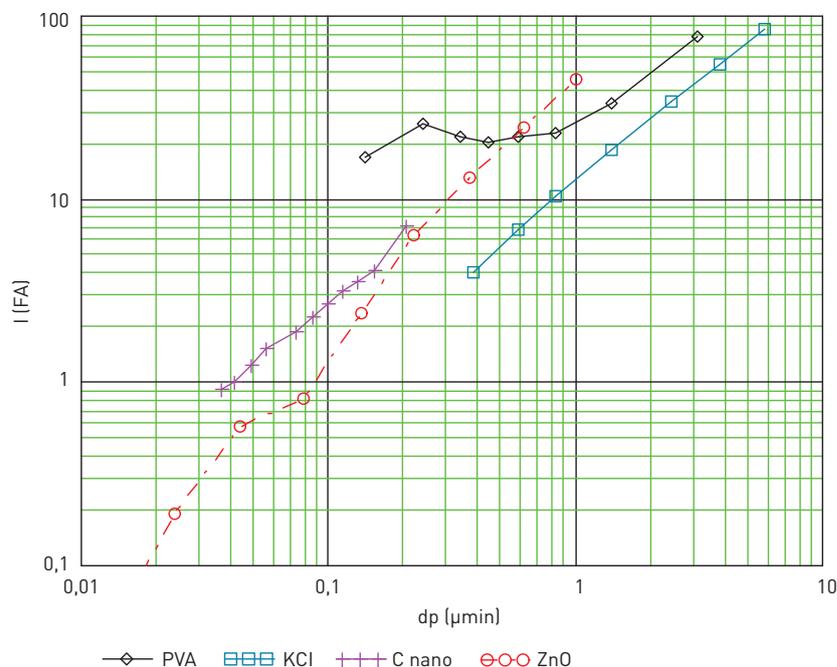


FIGURE 7a

État de charge « naturelle » des particules de PVA, de sel (KCl) (précipitateur/COP lasair 1001 et 310), de carbone nano (FMPS) et d'oxyde de Zn (ELPI)



MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Les essais ont été conduits avec un aérosol de fluorescéine. Le banc a été modifié, en insérant le tube ou la cassette en test à l'aval du précipitateur (cf. *Figure 8*). Ces essais sur tubes ont nécessité l'ajout d'un filtre (QMA/D47 mm) à

l'aval destiné à recueillir les particules non retenues sur les parois du tube. La cassette est, quant à elle, équipée de son propre filtre de prélèvement. La granulométrie de l'aérosol a été déterminée au moyen de l'impacteur ELPI, sa charge globale est donnée par l'électromètre.

TABLEAU I

État de charge « naturelle » des aérosols générés

Particule	dp (µm)	ne (a ; b)	fo (%)	Polarité (charge globale)	Mode de génération
KCl	0,4 - 7	(12,1 ; 1,085)	35-50	+	Pulvérisation voie liquide
PVA	0,15 - 3	/	10-30	-	Pulvérisation voie liquide
C nano	0,035 - 0,2	(44,4 ; 1,17)	20-65	+	Électroérosion
Oxyde de Zn	0,03 - 1	(49,9 ; 1,47)	20-25	+	Brosse tournante

(a, b : paramètres d'ajustement de la loi de charge : $ne = a \cdot dp^b$, fo : fraction des particules neutres)

FIGURE 7b

Distribution de la fraction des particules neutres avec sa loi d'ajustement (pointillés). Particules de carbone nano – Palas GFG 1000 (1 bar air, 1,5 bar argon, fréquence étincelles 500)

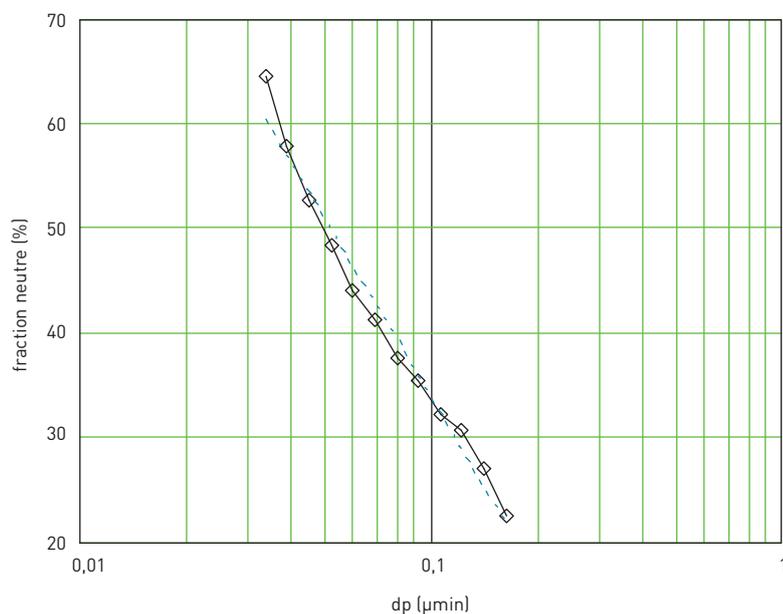


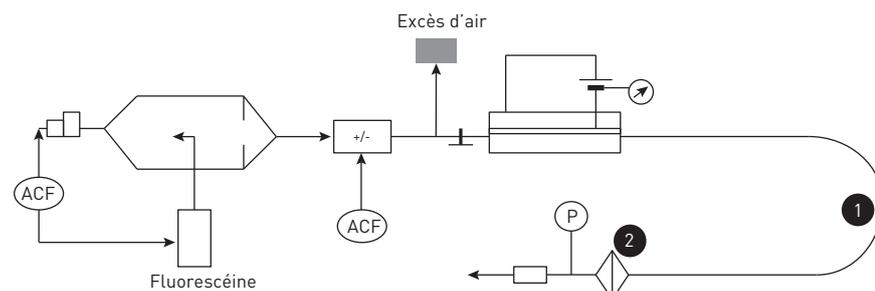
TABLEAU II

Caractéristiques des trois méthodes

Méthode	Polarité	État de charge	Fraction neutre
Electromètre	oui	global	non
Précipitateur	non	fonction de d_p	oui
ELPI	oui	fonction de d_p	Non

FIGURE 8

Schéma du montage avec aérosol de fluorescéine. 1) Tube 5 m testé, 2) filtre terminal



Configurations testées :

■ particules neutres, obtenues après une neutralisation partielle réalisée par passage dans le chargeur Topas en faisant fonctionner les deux électrodes positive et négative (+4kV/15 µA, -4kV/15 µA), puis précipitation des particules chargées restantes avec le précipitateur alimenté à 7,5 kV ;

■ particules chargées + et - par passage dans le chargeur Topas ;

■ trois matériaux constitutifs des tubes : carbone, polyamide (nylon) et PTFE (téflon).

Les caractéristiques des tubes testés sont données dans le *Tableau III*.

TABLEAU III

Géométrie des tubes

Tube	Longueur L (cm)	Diamètre interne Di (mm)
Carbone	493	4
PTFE	500	4
Polyamide	493	3,85

Le débit d'air dans les tubes, noté Q, a varié entre 3,5 et 4,2 l.min⁻¹. Les essais ont été effectués avec la cassette (Millipore) dans sa configuration fermée, au débit de 1,5 l.min⁻¹. Le matériau constitutif des cassettes est le polystyrène.

Un aérosol de fluorescéine a été généré à partir d'une solution à 0,5 % dans de l'eau désionisée au moyen du même système (AGK 2000, Palas). Les quantités retenues par le tube et le filtre sont déterminées par fluorimétrie (fluorimètre Jenway 2000). Le tube est lavé par un volume de 150 ml (en deux fois : 100 ml puis 50 ml) d'une solution de tétraborate de sodium (tampon pH9). Le filtre terminal est placé dans 20 ml de solution. Les quantités déposées sur les parois intérieures de la cassette sont analysées en introduisant un volume de 5 ml de solution (cassette fermée).

A partir de la masse de fluorescéine déposée dans le tube (mt) et de la masse retenue par le filtre terminal (mf) on déduit la fraction déposée dans le tube, $Fr = mt/(mt+mf)$.

De même, la mesure des masses déposées dans la cassette (mc) et sur le filtre placé à l'intérieur (mf) permet de déterminer la fraction déposée sur les parois de la cassette, $Fr = mc/(mc+mf)$.

RÉSULTATS

La distribution granulométrique de l'aérosol de fluorescéine, établie au moyen de l'impacteur ELPI, est caractérisée par un diamètre aérodynamique médian en masse égal à $0,73 \mu\text{m}$ et un écart-type géométrique $g = 2,21$. La concentration en nombre est égale à $6,105 \text{ part./cm}^3$, $d_{ae} \geq 28 \text{ nm}$ et la concentration massique, égale à $0,44 \text{ mg.m}^{-3}$.

Les principaux résultats sont donnés dans le *Tableau IV*.

Les taux de dépôt de particules dans le tube nylon sont du même ordre de grandeur quel que soit l'état de charge de l'aérosol. Ils sont proches du taux mesuré avec le tube conducteur en carbone. Les dépôts les plus importants sont mesurés avec le tube en téflon, matériau très isolant. Avec ce type de tube, le dépôt est également actif avec des particules neutres (effet de polarisation de la particule par le champ électrique généré par le tube [3]).

Les pertes par dépôts dans la cassette sont importantes pour les particules chargées mais pas pour les particules neutres.

Le calcul du dépôt dans un tube horizontal ($L = 5 \text{ m}$, $D_i = 4 \text{ mm}$) au débit de $3,8 \text{ l.min}^{-1}$, en l'absence de forces électriques, a été effectué à partir des corrélations fournies dans le travail de thèse de Charreau [15]. Les résultats sont donnés dans le *Tableau V* (Fr désigne la fraction de l'aérosol retenue). Le taux de dépôt de l'aérosol de fluorescéine calculé en l'absence de force électrique, voisin de 1 %, correspond aux valeurs trouvées pour les aérosols neutres avec le tube nylon.

FILTRATION

L'efficacité de filtration d'un média fibreux est étroitement liée à la charge électrique portée par les particules et/ou par les fibres [3]. Dans le cas de la présence de charges, la probabilité de capture des particules est augmentée du fait de la présence de forces électrostatiques qui peuvent prendre les formes suivantes :

- force de polarisation lorsque les

TABLEAU IV

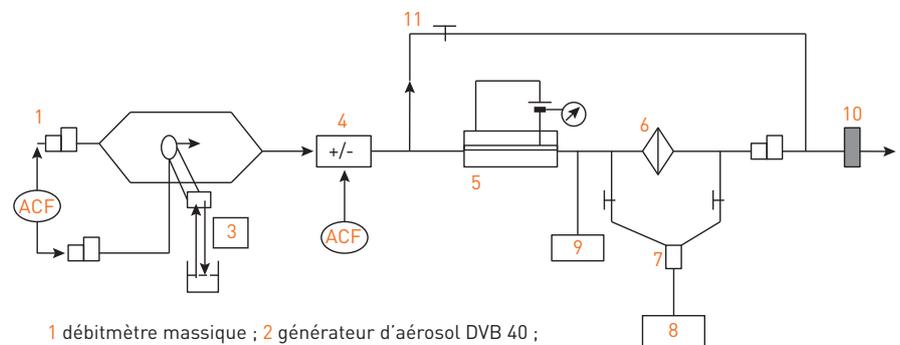
Résultats de mesure des dépôts sur tubes et cassette

Support	Courant global ⁽¹⁾ (fA)	Q (l.min ⁻¹)	Fr (%)
Tube carbone	- 1915, - 1970	4,0	3,2
Tube téflon	0	3,7	14,1
Tube téflon	- 2300, - 2500	3,7	56,6
Tube nylon	0	4,2	1,0
Tube nylon	- 3350	4,2	2,1
Tube nylon	+ 3400	4,0	1,85
Cassette	0	1,65	1,7
Cassette	- 3350	1,50	28,8
Cassette	+ 3400	1,51	16,8

⁽¹⁾ : courant délivré par l'électromètre

FIGURE 9

Schéma de montage pour la mesure de l'efficacité d'un filtre



- 1 débitmètre massique ; 2 générateur d'aérosol DVB 40 ;
- 3 solution NaCl alimentée par pompe péristaltique ;
- 4 chargeur électrique ; 5 précipitateur électrostatique ;
- 6 Filtre en test ; 7 diviseur de débit ; 8 COP ; 9 électromètre ;
- 10 filtre HEPA ; 11 by-pass ; ACF : Air comprimé filtré, séché.

fibres sont chargées et les particules neutres. Cette force, générée par la polarisation de la particule sous l'effet du champ électrique créé par les fibres chargées, dépend de la distance particule/fibre, de la densité de charge des fibres et de la constante diélectrique du matériau constitutif de la particule ;

■ force image lorsque les particules sont chargées et les fibres neutres ;

■ force coulombienne lorsque fibres et particules sont chargées.

Afin d'illustrer l'influence de la charge électrique portée par les particules et les fibres sur l'efficacité de filtration, deux filtres de type Electret, à fibres chargées électriquement, ont été étudiés. Ils sont utilisés dans la réalisation des demi-masques jetables. La configuration « fibres électriquement neutres » a été obtenue par neutralisation de la charge électrique du filtre suivant un protocole de trempe du filtre dans de l'isopropanol suivie d'une phase de séchage sous hotte inspiré du projet de norme Pr NF EN 779 (2009) [16].

TABLEAU V

Calcul du dépôt dans un tube horizontal ($L = 5 \text{ m}$, $D_i = 4 \text{ mm}$) - $3,8 \text{ l.min}^{-1}$ en fonction du diamètre aérodynamique.

dae (μm)	Fr (%)
0,1	0,54
0,5	0,47
0,75	0,90
1	1,48
1,5	3,11

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Des essais ont été conduits avec des aérosols neutres (po) et chargés électriquement (pc), obtenus à partir du même dispositif que celui décrit pour les essais sur tubes (couplage du neutraliseur/chargeur Topas avec le précipitateur électrostatique) et des aérosols chargés naturellement (pnat) (charge créée par le

dispositif de génération). La *Figure 9* présente le schéma de montage du banc d'essai utilisé à cet effet. La génération de l'aérosol diffère de celle utilisée dans les montages précédents dans la mesure où un nébuliseur en verre de type Devilbiss 40, alimenté par une solution de NaCl à 0,2 %, a été utilisé. L'aérosol est chargé négativement en appliquant un courant de - 30 μA à l'électrode du chargeur corona. En ce qui concerne les particules de PVA, le mode de génération utilisant la pulvérisation d'une solution (Palas AGK 2000) est maintenu.

Deux filtres en fibres de polypropylène chargés respectivement de classe P2 et P1, conformément à la norme EN-143 (2000) [17] ont été testés. Chaque filtre, découpé à un diamètre de 150 mm (diamètre de passage de l'air égal à 130 mm) est placé dans un porte-filtre inox. Le débit d'air alimentant le filtre, fixé à 20,5 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$, conduit à une vitesse de filtration de 2,6 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Les pertes de charge mesurées sont respectivement de 27 Pa pour le filtre P2 et de 13 Pa pour le filtre P1.

Chaque filtre a été testé dans sa configuration d'origine, c'est-à-dire avec les fibres chargées électriquement (fc), et après neutralisation (fo). Les concentrations amont/aval sont mesurées alternativement :

■ par comptage optique (compteur Lasair 1001, 8 canaux de 0,1 à 2 μm) pour le filtre P2 ;

■ au moyen de l'analyseur de mobilité électrique (FMPS 3091, TSI) (32 canaux de 6 nm à 500 nm), pour le filtre P1.

L'objectif de cette seconde série avec le filtre P1 est d'étudier le comportement dans le domaine des particules ultrafines (< 150 nm).

RÉSULTATS

FILTRE P2

La loi de charge de l'aérosol NaCl (chargeur Topas, + 6kV, 25 μA), établie par précipitateur électrostatique couplée à un compteur optique, est modélisée par $ne(d_p) = 89,46 \cdot dp^{1,878}$ ($0,1 \leq dp \leq 5 \mu\text{m}$). Les résultats des mesures d'efficacité de filtration sont représentés *Figures 10a et 10b*. Les comptages trop faibles au-delà

FIGURE 10a

Efficacité du filtre P2 à fibres chargées (fc) vis-à-vis de particules neutres (po) et chargées (pc)

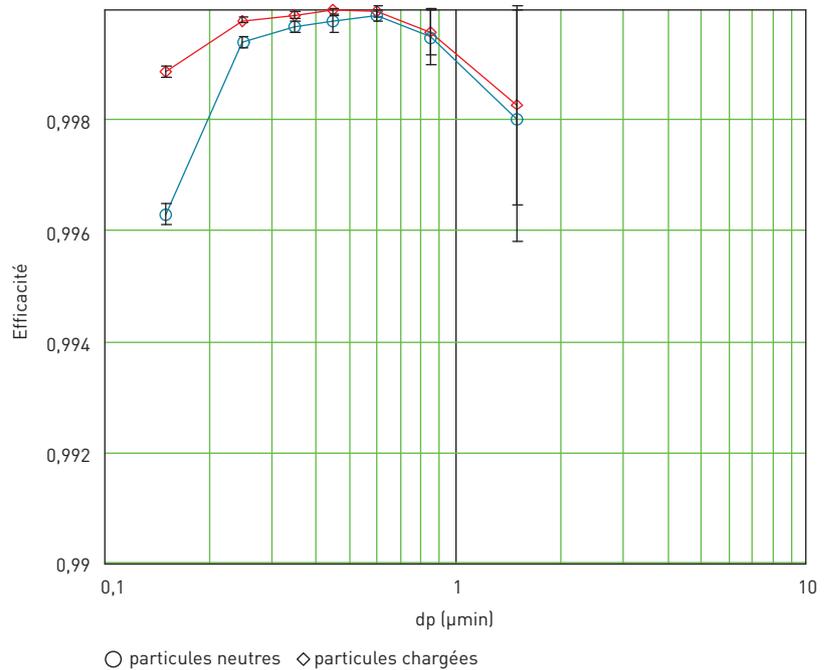
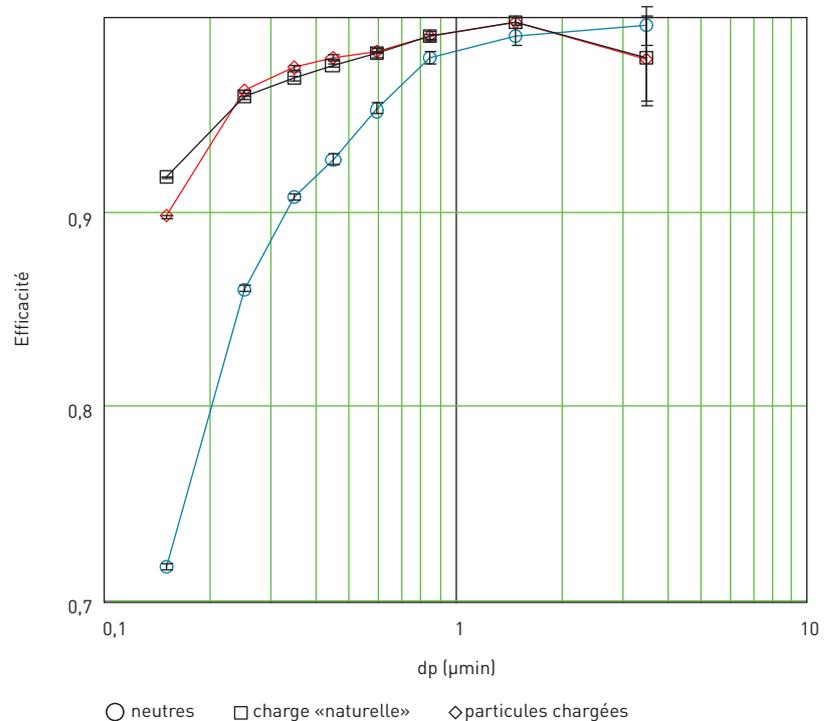


FIGURE 10a

Efficacité du filtre P2 à fibres neutralisées (fo) vis-à-vis de particules neutres (po) et chargées (pc) et naturellement chargées (pnat)



de 1 μm sont à l'origine des incertitudes relativement importantes sur la détermination de l'efficacité. L'interaction entre particules chargées/neutres et fibres chargées/neutres est clairement mise en évidence avec :

■ une très nette augmentation de l'efficacité avec les fibres chargées par rapport aux fibres neutralisées ;

■ une diminution de l'efficacité vis-à-vis des particules neutres, particulièrement avec le filtre neutralisé ;

■ une efficacité quasi-identique obtenue avec les particules chargées artificiellement et naturellement.

Le filtre chargé électriquement (fc) semble également efficace pour les particules chargées et neutres > 0,2 µm, démontrant l'efficacité du mécanisme de collecte des particules neutres par la force de polarisation. Notons les très bonnes performances du filtre électret avec un ratio efficacité sur perte de charge E/ΔP très élevé, qui justifie pleinement le recours à ce type de médias dans les appareils de protection respiratoire, en tout cas à l'état neuf. En effet, l'efficacité de ces médias est connue pour diminuer au cours du temps du fait de la disparition/masquage progressif des charges électriques [18].

Enfin, l'utilisation sur banc d'essai de particules chargées et neutres est intéressante car cette technique permet la détermination de l'efficacité minimale et maximale du filtre à une vitesse de filtration donnée.

FILTRE P1

La loi de charge de l'aérosol de PVA généré par le PALAS AGK 2000 (chargeur Topas, +6kV, 40 µA), établie par la méthode au précipitateur électrostatique, couplé à l'analyseur de mobilité électrique FMPS, est modélisée par $ne(d_p) = 51,6 \cdot dp^{1,05}$ ($0,03 \leq dp \leq 0,2 \mu\text{m}$).

Les Figures 11a et 11b représentent l'évolution de l'efficacité de filtration respectivement du filtre P1 avec fibres chargées et P1 avec fibres neutralisées vis-à-vis de l'aérosol de PVA chargé ou neutre.

L'effet de la charge des particules est mis en évidence dans les deux cas avec une force coulombienne dans le cas du filtre électret neuf, prépondérante par rapport à la force de polarisation, qui induit une efficacité de collecte maximale dans le cas des particules et des fibres chargées. Dans le cas du filtre neutralisé, c'est la force image due aux particules chargées vis-à-vis des fibres neutres qui augmente fortement l'efficacité de filtration. Une autre particularité de la capture des particules par force électrostatique apparaît également. Outre le haut niveau d'efficacité, les courbes d'évolution de l'efficacité de filtration montrent un minimum qui se situe généralement au

FIGURE 11a

Efficacité du filtre P1 à fibres chargées (fc) vis-à-vis de particules neutres (po) et chargées (pc)

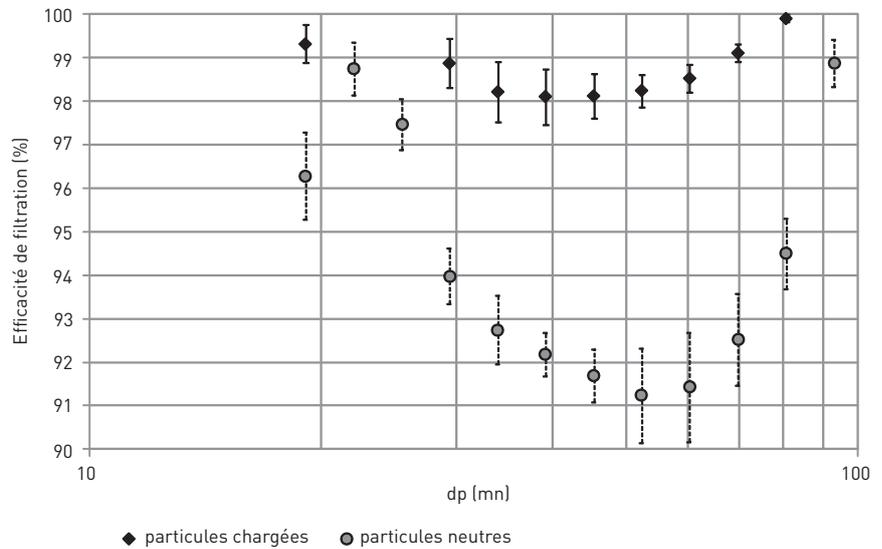
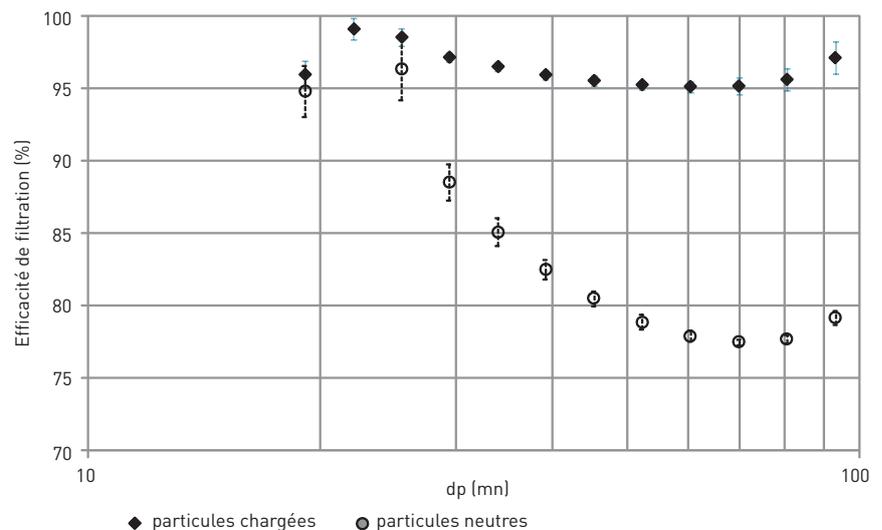


FIGURE 11b

Efficacité du filtre P1 à fibres neutralisées (fo) vis-à-vis de particules neutres (po) et chargées (pc)



voisinage de 100 nm en l'absence de charges (cf. Figure 11b) et se déplace vers les tailles plus basses jusqu'à 40 - 50 nm en présence de charges (cf. Figure 11a) [14].

Ces différents essais montrent bien l'effet des charges électriques sur les performances des filtres et, par conséquent, la nécessité de les supprimer. La technique la plus couramment employée pour la neutralisation des particules consiste à ioniser les molécules de l'air au moyen d'une source radioactive (Am^{241} , Kr^{85} , etc.). Les particules tra-

versant cette zone ionisée sont portées à l'équilibre de Boltzmann. Néanmoins, une étude effectuée par le laboratoire associé INRS/LRGP [19] a montré, pour les nanoparticules, que l'efficacité de filtration de l'aérosol à l'équilibre de Boltzmann, globalement neutre, pouvait différer significativement de l'efficacité établie vis-à-vis des particules réellement neutres. Le recours à la précipitation électrostatique pour obtenir un aérosol parfaitement neutre pourrait être une alternative intéressante.

CONCLUSION

L'étude montre les possibilités offertes par l'utilisation d'un simple précipitateur électrostatique et de la métrologie adéquate, pour la détermination de l'état de charge d'un aérosol. Une étude de sensibilité du système à la nature des particules analysées est également nécessaire pour comprendre comment l'état de charge des particules, atteint grâce au chargeur corona, est susceptible de varier avec la nature des particules (forme, composition chimique). En combinant l'ensemble des moyens de

mesure présentés dans cet article il est possible de caractériser précisément l'état de charge d'un aérosol.

L'influence de la charge électrique a été mise en évidence à partir de différents exemples représentatifs des pratiques courantes en métrologie des aérosols : échantillonnage au moyen de tubes, cassettes et collecte sur des filtres. Les essais effectués confirment qu'en matière d'échantillonnage, la charge électrique des particules peut être la cause principale des erreurs de mesure de la concentration et de la taille des particules. Dans le domaine de la

filtration des aérosols, l'absence de maîtrise de ce paramètre peut également être source d'erreurs dans l'établissement des performances.

En conclusion, il est vraiment primordial de supprimer, dans la mesure du possible, l'effet des charges électriques par neutralisation des particules et des différents supports.

Reçu le : 13/09/2011

Accepté le : 20/09/2011

BIBLIOGRAPHIE

[1] LIU B.Y.H., PUI D.Y.H., et al., *Electrostatic effects in aerosol sampling and filtration*, Ann. Occup Hyg., 29(2), pp. 251-269 (1985).

[2] DE JUAN L., BROWN S., et al. *Electrostatic effects in inertial impactors*, J. Aerosol Sci. 28(6), pp. 1029-1048 (1997).

[3] BROWN R.C., *Air filtration*, Pergamon press, 1^{re} édition (1993).

[4] MCMURRY PH., RADER D.J., *Aerosol wall losses in electrically charged chambers*, Aerosol Science and Technology, 4, pp. 249-268 (1985).

[5] MAISELS A., EINAR-KRUIS F., FISSAN H., *Coagulation in bipolar aerosol charger*, J. Aerosol Sci, 35, pp. 1333-1345 (2004).

[6] COHEN B.S., XIONG J.Q., CHING PING F., LI W., *Deposition of charged particles on lung airways*, Health Physics, 74(5), pp. 554-560 (1998).

[7] NIFUKU M., KATOH H., "A study on the static electrification of powders during pneumatic transportation and the ignition of dust cloud", Powder Technology, 135-136, pp. 234-242 (2003).

[8] HINDS W.C., *Aerosol Technology*, John Wiley&Sons, Inc. (1999).

[9] OUF F.X., SILLON P, *Charging efficiency of the electrical low pressure impactor's corona charger*, Aerosol Science and Technology 43, pp. 685-698 (2009).

[10] FORSYTH B., LIU B.Y.H., ROMAY F.J., *Particle charge distribution measurement for commonly generated laboratory aerosols*, Aerosol Science and Technology, 28, pp. 489-501 (1998).

[11] MATSUSADA S., OKI M., MASUDA H., "Control of electrostatic charge on particles by impact charging", Advanced Powder Technology, 18(2), pp. 229-242 (2007).

[12] GOLDMAN M., GOLDMAN A., *Les plasmas froids à pression atmosphériques – La décharge couronne*, Les plasmas dans l'industrie, Electra, Dopee85 (1985).

[13] HOCHRAINER D., *Measurement methods for electric charge on aerosols*, Ann. Occup Hyg., 29, pp. 241-249 (1985).

[14] BROWN R.C., *Tutorial review: Simultaneous measurement of particle size and particle charge*, J. Aerosol Sci. 28(8), pp. 1373-1391 (1997).

[15] CHARUAU J., *Etude du dépôt des particules dans les conduits*, Thèse/Rapport CEA R 5158 (1982).

[16] Pr EN 779, *Filtres à air de ventilation générale pour l'élimination des particules – Détermination des performances de filtration*, AFNOR (2009).

[17] EN-143, *Respiratory protective devices – Particle filters – Requirements, testing, marking* (2000).

[18] WALSH D., STENHOUSE J.I.T., "The effect of particle size, charge, and composition on the loading characteristics of an electrically active fibrous filter material", J. Aerosol Sci., 28, pp. 307-321 (1997b).

[19] MOURET G., *Etude de la filtration des aérosols nanométriques*, thèse INPL, Nancy (2008).

DÉTERMINATION DE LA DISTRIBUTION DE CHARGE D'UN AÉROSOL PAR PRÉCIPITATION ÉLECTROSTATIQUE

Un aérosol de PVA polydispersé est généré par nébulisation (générateur Palas AGK 2000) d'une suspension à 1 % dans l'eau DI filtrée. L'aérosol traverse le chargeur à effet couronne (Topas EAN 581) alimenté par une tension positive continue (6 kV, 25 μ A). Un compteur optique (PMS Lasair 1001) couplé à un diluteur (Palas VKL 10) a été utilisé pour la mesure de la concentration en particules à l'aval du précipitateur. Cet appareil compte les particules sur 8 canaux répartis de 0,1 à 2 μ m. Le débit d'air circulant dans le précipitateur ($Q_p = 16,5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$) est réglé au moyen d'une vanne et mesuré par un débitmètre massique. La *Figure A1* donne un exemple des concentrations mesurées.

A partir de ces concentrations, on détermine les perméances pour chaque diamètre de particule en fonction de la tension appliquée E en effectuant le rapport de la concentration $C_n(d_p, E)$ à la concentration $C_n(d_p, E=0)$. Un exemple est donné *Figure A2*.

A partir des tensions critiques E_c on détermine la densité de charge portée par les particules en fonction de leur taille (éq. 2 et 3, *Figure A3*).

FIGURE A1

Variation de la concentration par tranches granulométriques en fonction de la tension appliquée à l'électrode : 0/0,5/1/2/3/4/5/6/7 kV. Mesure par comptage optique

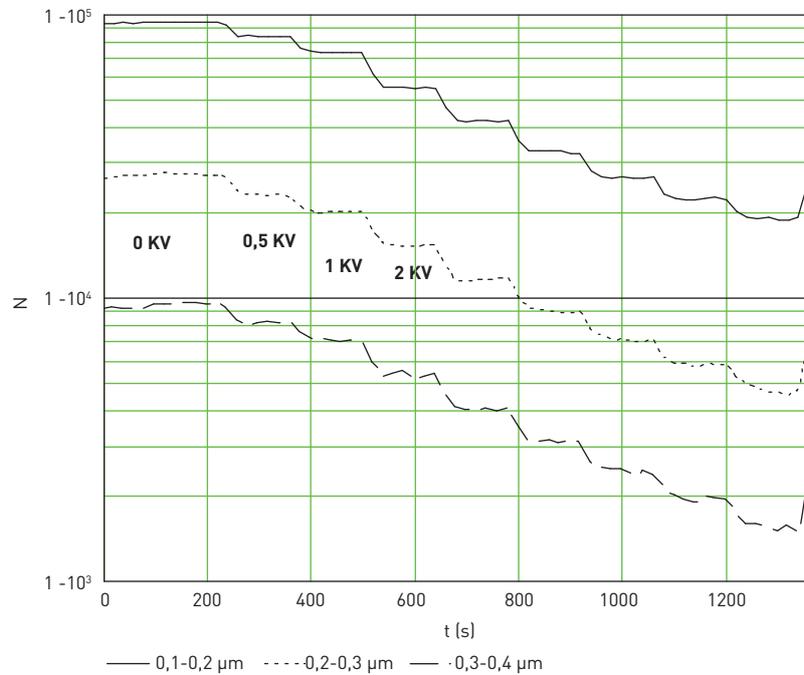


FIGURE A2

Variation de la perméance du précipitateur en fonction de la tension appliquée à l'électrode, permettant la détermination de la tension critique E_c . Débit $Q_p = 16,5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$

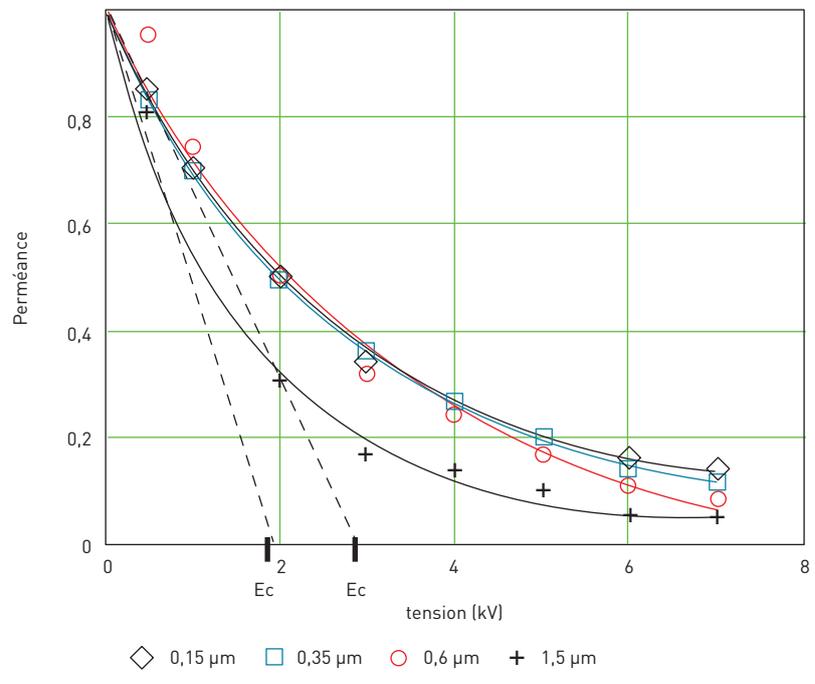


FIGURE A3

Distribution de la densité de charge (ne) en fonction du diamètre de particule.
Particule de PVA – Chargeur Topas (+6 kV, 25 μ A)

