



La granulométrie des aérosols

Quelques idées sur les techniques permettant son obtention

André Renoux*, professeur, directeur du LPATC, président d'honneur de l'Association Française d'Études et de Recherches sur les Aérosols (ASFERA)

Summary This paper makes a classification of the techniques permitting to estimate the size distribution of aerosols in three categories: dynamical methods (cascade impactors, diffusion batteries, SDI 2000, APS – Aerodynamic Particle Sizer), electrical methods (DMA – Differential Electrical Mobility Analysers, DMPS, SMEC) and optical ones (CNC – Continuous Flow Condensation Nucleus Counter). Performance and limits of different devices/instruments are indicated.

Mots-clés Aérosols, granulométrie, méthodes mécaniques, optiques, électriques.

Key-words Aerosols, size distribution, dynamical, electrical and optical measurement methods.

Inventé en 1920 par Schmaus, le terme *aérosol* désigne la suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides, ou les deux, présentant une vitesse de chute négligeable. Dans l'air, dans les conditions normales, ceci correspond à des particules dont les dimensions vont de quelques fractions de nanomètres à 100 μm . Dès maintenant, on note que le spectre granulométrique des aérosols couvre six ordres de grandeur avec, pour conséquence, l'impossibilité de le parcourir avec un seul appareil de mesure.

Depuis ces trente dernières années, la science des aérosols a pris un formidable essor. Ainsi, en 1961, au 1^{er} congrès européen de Mayence, nous n'étions qu'une trentaine de participants. Désormais, le Congrès Français sur les Aérosols (CFA) que pilote l'ASFERA, en compte plus de 100, l'European Aerosol Conference (EAC) en a rassemblé plus de 500 à Dublin en septembre 2000 et, en septembre 1998 à Edinbourg, l'International Aerosol Conference a réuni plus de 800 personnes. La science des aérosols est donc devenue une composante importante et dynamique du domaine scientifique et technique mondial. Et elle continue de se développer de façon spectaculaire [1].

En effet, vecteurs principaux de la pollution et de la radioactivité de l'air, les aérosols interviennent dans de nombreux phénomènes naturels. Citons le bilan radiatif de l'atmosphère, les échanges océan-atmosphère, la radioactivité atmosphérique naturelle, la formation des nuages et des précipitations, leur influence sur la visibilité, sans parler de leur action éventuelle sur la couche d'ozone ou de leur effet de serre... négatif.

Mais leurs interventions dans le monde industriel sont aussi importantes, que ce soit dans la climatisation, la ventilation, la filtration et l'épuration de l'air ou encore dans l'industrie des salles blanches. On doit les prendre en compte dans les industries de pointe utilisatrices de technologies impliquant certaines de leurs propriétés physiques et dont les produits fabriqués dépendent essentiellement des transferts de contamination : circuits intégrés, électronique, aérospatiale, nanotechnologies liées à la métallurgie, agroalimentaire, pharmacie. Ils interviennent également dans la sûreté des réacteurs nucléaires.

Or on s'aperçoit que le comportement des aérosols est essentiellement lié à leurs propriétés physiques, et celles-ci, *quelle que soit la nature des aérosols*, dépendent de leurs dimensions. On conçoit donc la nécessité de disposer de techniques de mesure de la granulométrie des aérosols. Dans le cadre de cet article, il ne nous sera pas possible d'évoquer les propriétés physiques des aérosols grâce auxquelles, pourtant, ont été conçus les appareils permettant d'en faire la métrologie. On pourra les trouver dans la référence [2]. Il n'est pas question non plus ici d'aborder le problème de leurs différents diamètres caractéristiques en n'oubliant pas que, en général, ils ne sont pas sphériques. En schématisant à l'extrême, on peut signaler que la sélection mécanique des aérosols fournit des diamètres aérodynamiques, les sélecteurs électrostatiques conduisent à un diamètre électrique lié à la mobilité électrique de la particule, les compteurs optiques, eux, fournissent un diamètre optique, lié à l'indice de réfraction. On s'en doute, les relations entre ces différents diamètres ne sont pas évidentes. Que l'on se console : sur le

* Université Paris XII, Faculté des sciences & technologies, Laboratoire de physique des aérosols et de transfert des contaminations (LPATC), avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex. Tél. : 01 45 17 13 62. Fax : 01 45 17 13 61. E-mail : renoux@univ-paris12.fr



terrain, on se contente d'utiliser le diamètre fourni par l'appareil. En laboratoire, bien entendu, on peut être amené à tenir compte de ces différences.

D'une façon générale, on peut classer les appareils permettant d'obtenir la granulométrie des aérosols en trois catégories : mécaniques, électriques et optiques.

Les méthodes mécaniques

L'impacteur en cascade

Dans certaines conditions, un aérosol peut être soumis à un mouvement curviligne caractérisé par un nombre sans dimension : le nombre de Stokes (Stk), défini comme le rapport entre la distance d'arrêt d'une particule et une dimension caractéristique de l'obstacle. Ainsi, pour un flux perpendiculaire à un cylindre de diamètre d , le nombre de Stokes s'écrit :

$$Stk = \frac{A}{d} = \frac{\tau U_o}{d}$$

où U_o est la vitesse de l'air, et τ le temps de relaxation de l'aérosol, c'est-à-dire le temps au bout duquel, sous l'effet du mouvement brownien, il change de direction.

Un cas particulier de mouvement curviligne est l'impaction et, sur ce principe, on a construit des impacteurs en cascade qui permettent d'obtenir la répartition granulométrique d'un aérosol en nombre ou en masse. Comme le montre la *figure 1*, un aérosol est amené à travers un orifice (nez) et dirigé vers une plaque d'impaction qui oblige le flux d'air à prendre brusquement une direction à 90° de son trajet initial. Les particules d'inertie suffisante ne

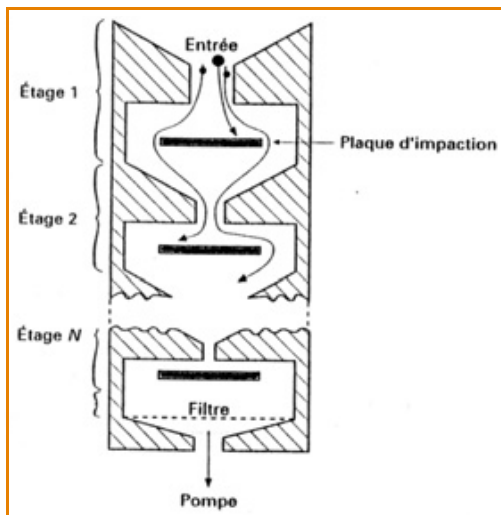


Figure 1 - Schéma d'un impacteur en cascade.

peuvent suivre les lignes de courant et vont impacter. Les plus petites, au contraire, suivent les lignes de courant et ne sont pas captées. Mais elles peuvent l'être par l'étage suivant si l'air est amené dans un second orifice plus petit lui communiquant une vitesse plus grande. On peut ainsi mettre à la suite plusieurs étages, comme dans l'impacteur Andersen qui en compte huit, le dernier étage captant les particules les plus fines. Les impacteurs permettent de mesurer les aérosols de dimensions comprises entre 0,3 micron et quelques dizaines de microns. En opérant à très basse pression, on peut descendre jusqu'à 3.10^{-2} microns.

Le dépouillement se fait par pesée, par microscopie optique ou électronique (on a donc la possibilité de visualiser les aérosols) [3], éventuellement par les techniques radioactives [4]. En fait, ces méthodes sont lourdes, et dernièrement, pour rendre l'exploitation de ces appareils plus pratique et automatique, on a eu l'idée de remplacer chaque plaque de collection par un quartz piézo-électrique dont la fréquence de vibration diminue avec le poids des aérosols recueillis (QCM, California Measurement). On peut aussi associer à ces appareils une détection électrique (effet couronne pour charger l'aérosol et électromètre relié à chaque étage). C'est le ELPI de Dekati mis au point en Finlande [5] et commercialisé en France par ECOMESURE.

Les batteries de diffusion

Bien que plus gros que les molécules gazeuses, les aérosols subissent le mouvement brownien. Soit un volume dont la concentration particulaire n n'est pas homogène mais présente, suivant une direction ox , un gradient dn/dx . Le flux d'aérosols, c'est-à-dire le nombre de particules qui, pendant l'unité de temps et à travers une surface unité, passent de la région de forte concentration à celle de faible concentration, est donné par la loi de Fick [6] :

$$J = -D \frac{dn}{dx}$$

Le coefficient de proportionnalité D est, par définition, le coefficient de diffusion des aérosols (L^2T^{-2}). Plus la particule est petite, plus D est élevé. Différentes théories permettent de relier D au rayon r des particules supposées sphériques par une relation univoque.

A partir de ce phénomène, on a réalisé des appareils capables de capter les aérosols par diffusion : ce sont les batteries de diffusion. La *figure 2* montre les principaux types de batteries utilisées dans la pratique. En effectuant une mesure amont et aval de



RECHERCHE

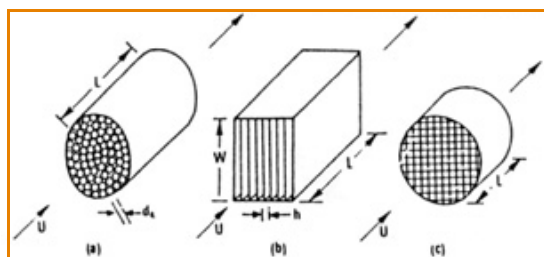


Figure 2 - Différents types de batteries de diffusion.

la concentration particulaire de l'air, on peut arriver à obtenir, à l'aide d'un traitement informatique approprié, la granulométrie de l'aérosol.

Les batteries de diffusion sont efficaces pour des particules de dimensions comprises entre 10^{-3} et 0,2 micron.

Le SDI 2000

A partir de travaux sur la perméance dans les lits granulaires, Boulaud et Diouri [7-8] ont mis au point une batterie de diffusion originale constituée de lits granulaires, dont la capacité de colmatage est bien supérieure à celle des batteries classiques, tout en étant aussi facile à réaliser. Combinée à un impacteur à étages, elle forme le SDI – Spectromètre Diffusionnel et Inertiel (figure 3).

L'impacteur sélectionne (nous l'avons vu) les aérosols de diamètre supérieur à $0,3 \mu\text{m}$. La batterie de diffusion, formée de six canaux en parallèle de 4 cm de diamètre, contient des billes de verre de

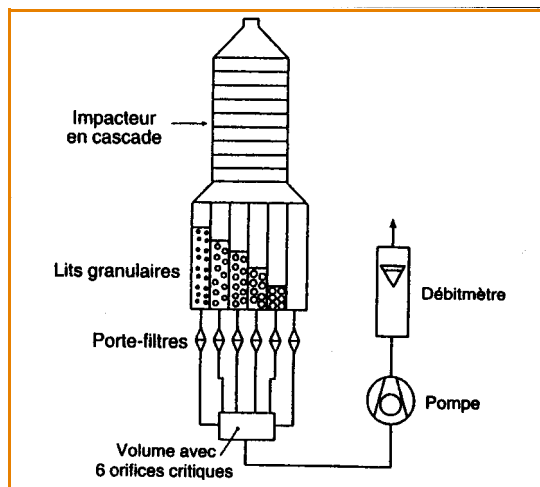


Figure 3 - Schéma du SDI 2000.

diamètre allant de 1 à 5 mm. En aval de la batterie, six filtres recueillent les particules ayant traversé le dispositif. Ce système, qui couvre un domaine s'étendant de $10^{-2} \mu\text{m}$ à $20 \mu\text{m}$ (d'où son nom de SDI 2000), a permis aussi bien la mesure des aérosols émis par les diesels, que celle de la fraction attachée des descendants radioactifs à vie courte du radon.

L'APS et l'Aérosizer

Basé sur les travaux de Wilson et Liu [9], l'Aéroparticule Sizer (APS) (figure 4) est un appareil dans lequel l'air chargé en aérosols est fortement

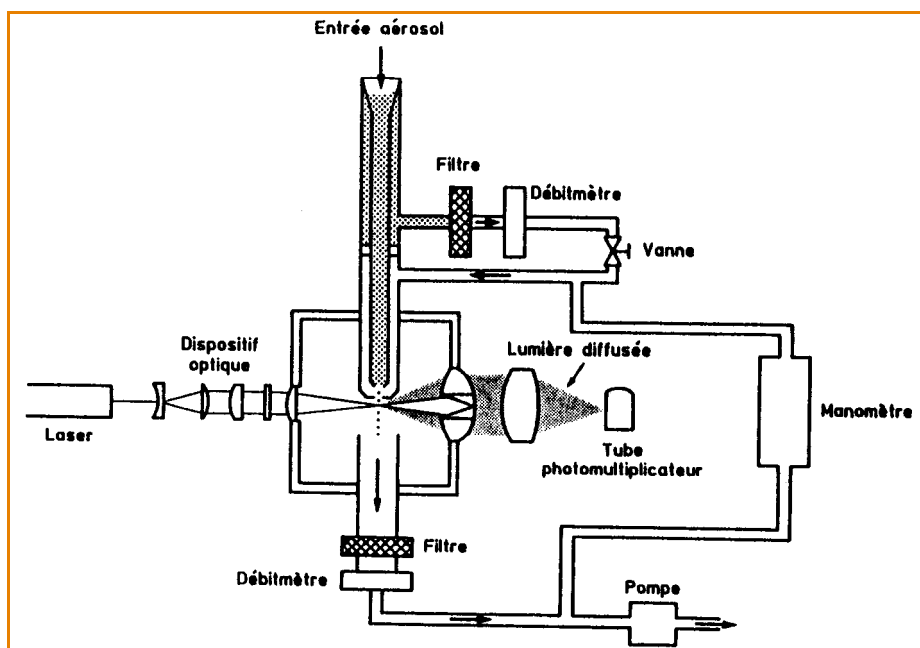


Figure 4 - Schéma de l'Aéroparticule Sizer (APS).



accélération en traversant un orifice fin. Si elles ont une inertie suffisante, certaines particules vont mettre un certain temps avant d'ajuster leur vitesse à celle de l'air. Ce retard est proportionnel à leur temps de relaxation qui est fonction de leur diamètre aérodynamique, de sorte que ce dernier peut être obtenu en mesurant la vitesse de chaque aérosol juste après l'orifice. On la mesure à l'aide d'un faisceau laser dédoublé formant deux points atteints successivement par les particules. Chaque aérosol produit donc deux impulsions lumineuses, qu'un photomultiplicateur convertit en impulsions électriques. Les diamètres détectables varient de 0,5 μm (temps de vol 800 ns) à 30 μm (temps de vol 5000 ns), l'horloge de l'APS ayant une résolution de 2 ns. Cet appareil est commercialisé par la firme américaine TSI.

Basé sur une idée de Dahneke [2], l'Aérosizer fonctionne sur le même principe que l'APS, mais la vitesse de l'air est sonique à la sortie de l'orifice d'accélération. Le domaine couvert est plus vaste, puisqu'il va de 0,5 à 200 μm .

L'un des inconvénients de ces deux dispositifs est qu'ils ne donnent pas la même réponse pour les particules solides ou liquides de même dimension car les particules liquides peuvent se déformer sous l'effet de l'accélération brutale qu'elles subissent [2].

Les méthodes électriques

Un aérosol qui possède une ou plusieurs charges élémentaires s'appelle un ion, et est alors caractérisé par sa mobilité électrique Z . Soumis à un champ électrique E , il prend une vitesse V proportionnelle à E suivant la relation $V = ZE$, Z est habituellement exprimée en $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. La relation d'Einstein permet de relier Z et le coefficient de diffusion D d'un ion portant p charges élémentaires :

$$\frac{Z}{D} = \frac{pe}{KT}$$

K est la constante de Boltzmann et T la température absolue. La relation de Harper [2] permet d'évaluer le nombre maximum de charges élémentaires p_{max} que peut prendre une particule de rayon r (micron), soit : $p_{\text{max}} = 41745 r^{1.7}$. Ainsi, au-delà de 1 micron, une particule peut porter plusieurs charges élémentaires, ce qui a pour effet de la faire paraître identique à un aérosol plus petit qui ne porterait qu'une seule charge. C'est ce problème des charges multiples qui impose la limite supérieure des sélecteurs électrostatiques d'aérosols à 1 μm .

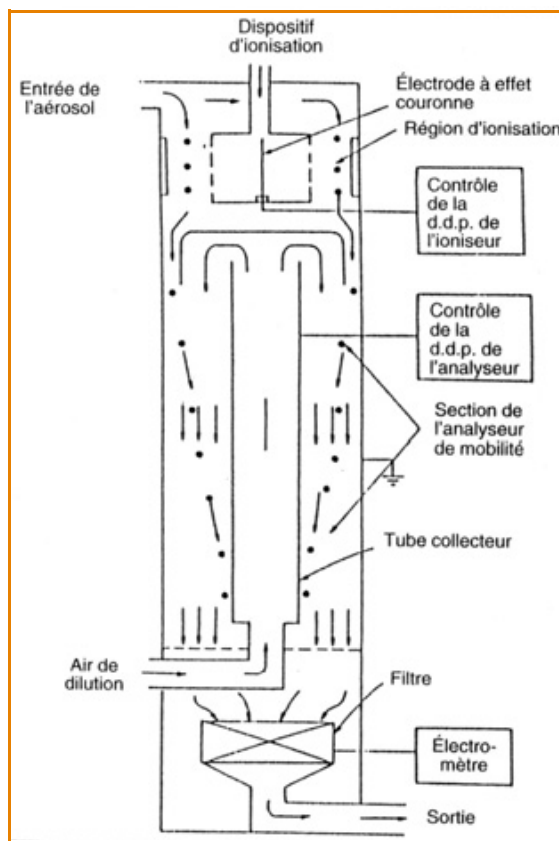


Figure 5 - Schéma de l'Electrical Aerosol Analyzer (EAA).

Cela étant, si l'on veut déterminer la granulométrie des aérosols grâce à leurs propriétés électriques, il faut préalablement les charger électriquement, soit par effet couronne (charge unipolaire), soit à l'aide d'une source radioactive (charge bipolaire s'appuyant généralement sur la loi de Boltzmann [2, 6]). La figure 5 donne le schéma de l'EAA – Electrical Aerosol Analyzer – mis au point par Whitby et Clark [10]. Les aérosols sont ionisés en traversant un nuage d'ions unipolaires positifs à un débit de 4 Lmin^{-1} , puis pénètrent dans l'analyseur de mobilité, ayant acquis un nombre de charges relié de façon prévue par la théorie à leurs dimensions. L'analyseur de mobilité se compose d'un cylindre (relié à la terre) muni d'une électrode axiale portée à une tension continue négative. Le flux d'air central est de l'air filtré, l'air chargé en aérosols arrivant quant à lui à la périphérie du cylindre sur une faible épaisseur. Les ions de mobilité supérieure à une certaine valeur z sont captés par l'électrode axiale, les autres passent à travers l'analyseur et sont arrêtés par le filtre relié à un électromètre. La théorie indique qu'il existe une relation monotone entre la mobilité d'un ion et son diamètre. De ce fait, la différence du signal donné par l'électromètre pour deux valeurs données de la tension V de



RECHERCHE

l'électrode axiale (à chaque valeur de V correspond une valeur de z) est fonction du nombre de particules présentes dans le domaine de mobilités correspondant. L'appareil classe les particules en 10 domaines compris entre $3 \cdot 10^{-3}$ et 1 micron, pour des concentrations (fonctions des dimensions mesurées) variant de 10 à 10^6 cm^{-3} .

A partir de ce système, en jouant sur les débits des aérosols et de l'air de dilution et en divisant l'électrode axiale en deux parties, on peut, à l'aide d'une seule mesure, retrouver la valeur moyenne de la fonction de répartition en mobilités sur un intervalle donné. Un tel dispositif s'appelle un Analyseur Différentiel de Mobilité Électrique – ADME (DMPS en anglais). Les aérosols ayant traversé l'EAA ou l'ADME sont comptés grâce à un compteur de noyaux de condensation (CNC) dont nous parlerons plus loin. Récemment, Pourprix *et al.* [11] ont développé un nouvel appareil, le SMEC – Spectromètre de Mobilité Électrique Circulaire – constitué de plaques parallèles circulaires comportant deux cavités d'introduction et une d'extraction de l'aérosol. Une de deux plaques est portée à un potentiel électrique U_1 , l'autre est mise à la masse, ce qui crée un champ électrique uniforme E entre elles. Un flux d'air filtré et sec Q_g est injecté à la périphérie du SMEC. L'aérosol à étudier est introduit à travers une mince fente circulaire de rayon a découpée sur la plaque supérieure de l'analyseur avec un débit Q_a . Les particules sélectionnées sont récupérées à travers un trou d'extraction placé au centre de la plaque inférieure (figure 6). Là encore, leur détection s'effectue à l'aide d'un CNC. A l'aide de ce type de SMEC, Le Bronnec, dans mon laboratoire et en liaison avec le CEA, a pu remonter, dans certaines conditions, à la taille, bien entendu, mais aussi à la masse, à la densité et même au facteur de forme dynamique de certains aérosols [12].

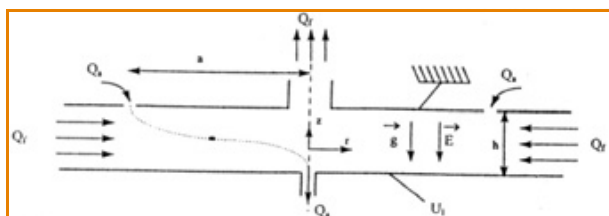


Figure 6 - Le SMEC différentiel à trou central.

Les méthodes optiques

Lorsqu'un faisceau lumineux traverse de l'air renfermant des aérosols, deux types de phénomènes se produisent :

- la lumière incidente est transmise avec une intensité diminuée (absorption),

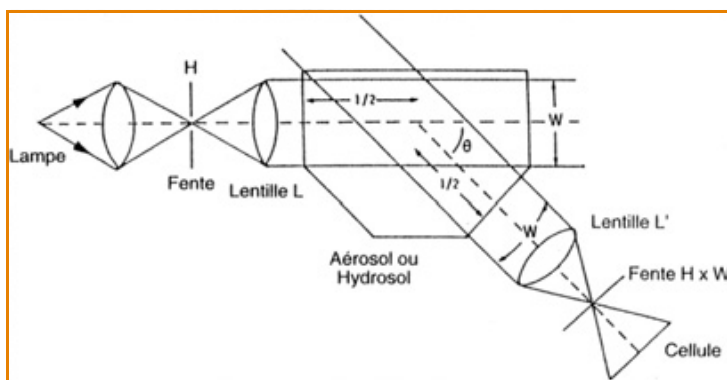


Figure 7 - Schéma d'un compteur optique de particules (COP).

- la lumière est dispersée dans toutes les directions (diffusion).

Peu d'appareils correspondent au premier phénomène du fait de difficultés technologiques difficiles à résoudre. Dans cet exposé, je traiterai essentiellement des compteurs optiques de particules basés sur la diffusion de la lumière. La diffusion de la lumière par un aérosol de diamètre d_p est, en général, gouvernée par le nombre sans dimension qui est le rapport entre la circonférence de la particule (supposée sphérique) et la longueur d'onde λ de la lumière :

$$\alpha = \frac{\pi d_p}{\lambda}$$

Pour les particules de diamètre $d_p < 5 \cdot 10^{-2}$ microns, la loi de Rayleigh donne l'intensité $I(\theta)$ de la lumière diffusée dans la direction θ par rapport à la direction incidente, à la distance h de la particule [2, 6] :

$$I(\theta) = \frac{I_0 \pi^4 d^6}{8h^2 \lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) (1 + \cos^2 \theta)$$

m étant indice de réfraction de la particule, I_0 l'intensité lumineuse dans la direction $\theta = 0^\circ$.

Pour $d_p > 5 \cdot 10^{-2}$ microns, on doit utiliser la théorie de Mie qui est une solution complète des équations électromagnétiques de Maxwell, ou la théorie de Lorenz-Mie [13].

Quoiqu'il en soit, on sait donc relier l'intensité $I(\theta)$ aux dimensions des aérosols et, suivant ce principe, on a construit des appareils, les compteurs optiques de particules, qui, à partir de la lumière diffusée, fournissent une granulométrie automatique des aérosols. La figure 7 présente le schéma d'un appareil de ce type, dans lequel on place le détecteur de lumière diffusée à un angle θ donné (par exemple $\theta = 90^\circ$ dans les compteurs GRIMM). La réponse de ce type de compteur varie beaucoup en fonction de l'indice de réfraction de particules et c'est pourquoi



on a très longtemps utilisé des sources de lumière blanche permettant de couvrir le domaine 0,3 μm - 100 μm . L'utilisation de sources laser, He-Ne en général, permet de descendre à 0,1 micron.

Les compteurs de noyaux de condensation

Ainsi, la limite de détection des compteurs optiques de particules est de l'ordre de 0,1-0,3 micron. Or les particules les plus petites sont de loin les plus nombreuses dans l'air, et leur détection et leur mesure revêtent une importance considérable. On devra également de plus en plus les prendre en compte dans le contrôle des salles blanches liées aux industries de pointe, ainsi que pour les problèmes de santé liés à la pollution atmosphérique particulaire. Pour les détecter, compte tenu du fait que ces aérosols ultrafins ne peuvent pas diffuser une intensité lumineuse détectable, on utilise un artifice. Au moment de la mesure, on produit sur eux une condensation de vapeur (eau ou alcool) par refroidissement, après les avoir placés en atmosphère saturée. L'aérosol sert alors de germe de condensation à une gouttelette liquide dont les dimensions sont de quelques microns, et qui peut être détectée comme dans les compteurs optiques de particules. On a réalisé un compteur de noyaux de condensation (CNC). L'un des CNC les plus performants est celui mis au point dans les laboratoires du CEA par l'équipe Bricard [14] et commercialisé par la firme américaine TSI (*figure 8*), aucun industriel français ne s'étant intéressé à ce type d'appareils. L'air chargé en aérosols pénètre dans le saturateur porté à 35 °C et se charge en vapeur de butanol. La condensation sur les noyaux fins s'effectue en faisant circuler cet air dans un tube réfrigéré à 10 °C par effet Peltier, la détection des gouttelettes, qui peuvent

atteindre plusieurs μm , s'effectuant à partir de la lumière qu'elles diffusent dans la direction $\theta = 45^\circ$. Il s'agit d'un CNC à flux continu au débit de 2,5 Lh^{-1} permettant de mesurer des concentrations d'aérosols comprises entre 10^{-2} et 10^7pcm^{-3} . Une théorie complète de cet appareil a été élaborée dans nos laboratoires par Metayer [15] et Assa [16], ce dernier ayant mis au point un CNC à grand débit (28Lmin^{-1}) et un grossisseur de particules à flux continu qui, associé à un compteur optique de particules classique, permet de détecter des particules de 10 nm avec une efficacité de 50 %. Il est bien évident que cet appareil ne peut que dénombrer les particules. Mais si on lui associe une batterie de diffusion, on obtient alors un dispositif qui permet, à l'aide d'un traitement informatique, d'effectuer l'analyse granulométrique des aérosols de dimensions comprises entre $2 \cdot 10^{-2}$ et 0,2 μm . On l'a vu, on peut aussi associer le CNC à un sélecteur électrostatique (SMEC ou DMA). Sous l'impulsion de Rebours, notre équipe a récemment montré, à partir des travaux de Assa, une relation de dépendance univoque entre la dimension des gouttelettes finales et celles des nanoparticules initiales lorsque ces dernières ont des dimensions comprises entre 4 et 10 nm [17-18]. L'introduction des aérosols fins à détecter au centre du condenseur, avec un débit d'air propre saturé en alcool à la périphérie, permet d'améliorer l'efficacité du CNC pour les particules de dimensions inférieures à 10 nm. On obtient ainsi une efficacité de 50 % pour les aérosols de 3 nm [19].

Dans un article récent, Mc Murry indique combien cette réalisation de l'équipe Bricard-CEA a marqué la métrologie des noyaux de condensation [20].

Conclusion

Au cours de ces dernières années les progrès technologiques ont fait évoluer considérablement les méthodes permettant d'obtenir la granulométrie des aérosols, qu'elles soient optiques, électriques ou mécaniques. Malgré cela, la lecture du manuel d'utilisation des différents appareils commercialisés ne suffit pas à en garantir une bonne utilisation. Ainsi, il n'est pas évident qu'un échantillon représentatif de l'aérosol arrive bien dans l'appareil de mesure. On prélève donc un échantillon dans l'air et on le transporte, le long d'un conduit, jusqu'au détecteur. La *figure 9* [21] montre les différentes parties d'un dispositif de prélèvement d'aérosols. A chaque étape correspond une efficacité (E_C , E_T , E_S), conduisant à ce que l'on appelle l'efficacité d'échantillonnage E_E , qui est la probabilité qu'a un aérosol du milieu étudié d'arriver dans le dispositif

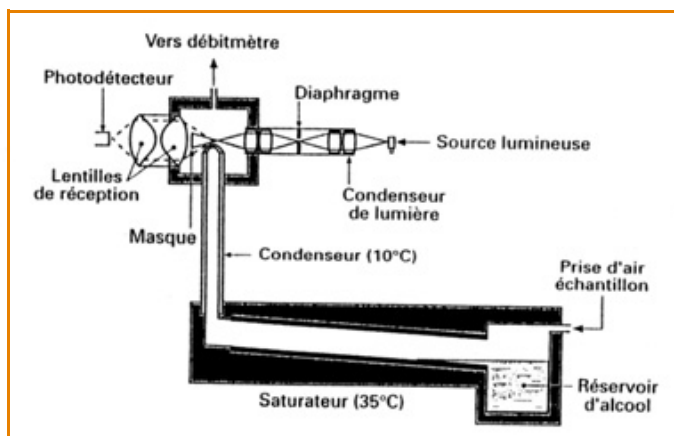


Figure 8 - Le CNC à flux continu.



RECHERCHE

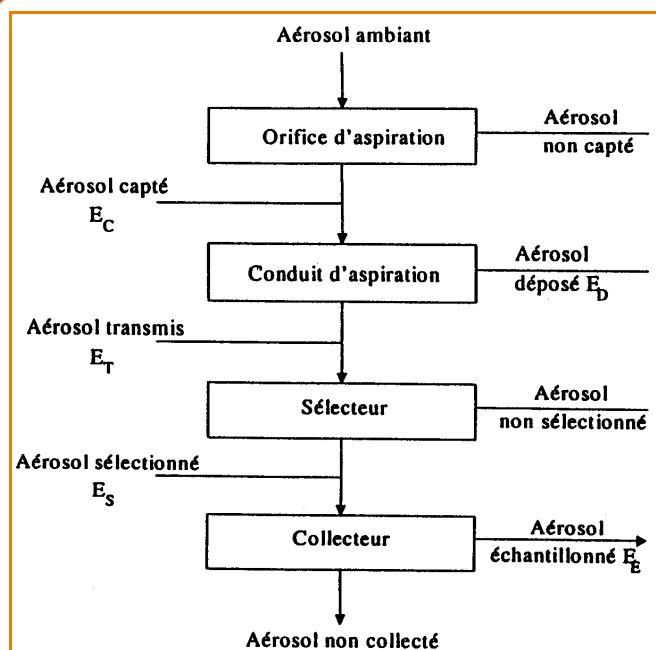


Figure 9 - Les différentes étapes d'un dispositif de prélèvement d'aérosols.

granulométrie [22]. Dans certains cas, surtout pour les aérosols de $d_p > 3 \mu\text{m}$, si l'on ne prend pas toutes les précautions, E_E peut être voisine de zéro [21]. La science et métrologie des aérosols est donc un métier qui exige de véritables spécialistes. C'est pourquoi j'ai créé, il y a plus de 15 ans, le DESS « Science des Aérosols Génie de Contamination » que je dirige à l'université Paris XII en liaison avec l'INSTN (Dr D. Boulaud). Ce DESS forme, dans ce domaine, les professionnels dont l'industrie et l'entreprise ont besoin.

Références

- [1] Prening O., *History of Aerosol Science*, Ac. Sc. Autriche Ed., Vienne, 2000.
- [2] Renoux A., Boulaud D., *Les Aérosols - Physique et Métrologie*, Lavoisier Ed., Paris, Londres, New York, 1998.
- [3] Tymen G., *Répartition granulométrique de l'aérosol naturel et des particules radioactives issues du radon*, thèse d'État (Brest), 1979; Rapport CEA R 4965, 1980.
- [4] Barzic J.-Y., *Étude de l'aérosol d'une mine uranium*, thèse de 3^e cycle (Brest), 1975; Rapport CEA R 4743, 1975.
- [5] Keskinen J., Pietarinen K., Lehtimäki M., *Electrical low pressure impactor*, *J. Aerosol Sci.*, 1992, 23/41, p. 353.
- [6] Bricard J., *Physique des Aérosols*, Rapport CEA R 4831, 1977.

- [7] Boulaud D., Diouri M., *A new inertial and diffusional device (SDI 2000)*, *J. Aerosol Sci.*, 1988, 19, p. 927.
- [8] Boulaud D., *Use of granular beds in inertial impaction regime for aerosols sizer distribution measurements*, *J. Aerosol Sci.*, 1991, 22/3, p. 273.
- [9] Wilson J.C., Liu Byh., *Aerodynamic Sizer Measurement by laser. Doppler Velocimetry*, *J. Aerosol Sci.*, 1980, 11/2, p. 139.
- [10] Whitby K.T., Clark W.E., *Electric aerosol particle counting and size distribution measurements system for the 0,015 to μm size range*, Tellus, 1996, 18, p. 573.
- [11] Pourprix M., Ooghe M., Mesbah B., Boulaud D., *Radial Flow Differential Mobility Analyser*, 4th International Aerosol Conference, Los Angeles, 1994, p. 463.
- [12] Le Bronnec E., *Utilisation des effets de gravité dans le spectromètre de mobilité électrique circulaire pour remonter aux dimensions, à la masse, à la densité et au facteur de forme dynamique des aérosols*, thèse (Paris XII), 1998.
- [13] Gouesbet G., Grehan G., Maheu B., *Generalized Lorenz-Mie Theory and Applications to optical sizing*, In the Proc. 2nd Intl. Congres Opt. Particle Sizing, D. Hirlman Ed., Arizona State University Tempe, 1990.
- [14] Bricard J., Madelaine G., Reiss P., Turpin P.-Y., *Compteur de noyaux de condensation à flux continu*, C.R. Acad. Sciences, 1972, p. 275.
- [15] Metayer Y., *Techniques de mesure de l'aérosol fin*, thèse d'État (Paris XII), 1982; Rapport CEA R 5417, 1987.
- [16] Assa Achy M., *Mise au point et étalonnage d'un compteur de noyaux de condensation à grand débit*, thèse d'État (Paris XII), 1987.
- [17] Rebours A., *Étude de la détection et de la granulométrie de temps réel de l'aérosol ultrafin par un système de grossissement de particules*, thèse d'État (Paris XII), 1994; Rapport CEA R 5704, 1995.
- [18] Rebours A., Boulaud D., Renoux A., *Recent advances in nanoparticles size measurements with a particle grow system combined with an optical particle counter. A feasibility study*, *J. Aerosol Sci.*, 1996, 27, p. 1227.
- [19] Stolzenburg M.R., Mc Murry P.H., *An ultrafine aerosol Condensation Nucleus Counter*, *Aerosol Sci. Technol.*, 1991, 14, p. 48.
- [20] Mc Murry P.H., *The History of Condensation Nucleus Counters*, *Aerosol Sci. Technol.*, 2000, 33 (4), p. 279-322.
- [21] Witschger O., *Étude théorique et expérimentale des facteurs physiques d'échantillonnage des polluants particuliers*, thèse (Paris XII), 1996.
- [22] Boulaud D., *Éléments de Physique des Aérosols : transfert, formation, échantillonnage*, Journée d'Études, CITEPA Éd., Paris, 2000, p. 2.

NDLR

Le Pr Renoux a longtemps collaboré activement à l'animation de la revue de chimie analytique de la SFC *Analysis*, ainsi qu'à la promotion de cette discipline au travers de ses enseignements. En publiant ce nouvel article dans les colonnes de *l'Actualité Chimique*, le comité de rédaction tient à saluer cette action et encourage également tous les analystes à présenter à l'ensemble de la communauté des chimistes les dernières avancées de leur discipline – P. Arpino.