

RAPPORT D'ÉTUDE

11/05/2004

N°INERIS-DRC-04-56770-AIRE-n°0401-OB1

## **Exposition par inhalation aux aérosols**

Principes et méthodes de mesures

**INERIS**



# **Exposition par inhalation aux aérosols**

## **Principes et méthodes de mesures**

**Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD)**  
**Service de l'Environnement Industriel**  
**Bureau de la Pollution Atmosphérique, des Equipements Industriels Energétiques et des Transports**  
**20, avenue de Ségur**  
**75302 PARIS 07 SP**

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

O. Blanchard - F. Del Gratta – M. Durif - E. Frejafon - O. Le Bihan

## PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	<b>Rédaction</b>	<b>Vérification</b>	<b>Approbation</b>
<b>NOM</b>	O. Blanchard	O. Le Bihan	R. Perret
<b>Qualité</b>	Ingénieur Unité Qualité de l'Air	Ingénieur Unité Qualité de l'Air	Responsable Unité Qualité de l'Air
<b>Visa</b>			

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
<b>2. GENERALITES .....</b>	<b>7</b>
<b>3. CONVENTIONS GRANULOMETRIQUES .....</b>	<b>9</b>
3.1 DANS L'AIR AMBIANT.....	9
3.2 EN HYGIENE INDUSTRIELLE .....	10
<b>4. METHODES DE MESURES .....</b>	<b>13</b>
4.1 MESURES EN MASSE .....	13
4.1.1 Collection sur filtre .....	13
4.1.2 Echantillonneurs gravimétriques en continu à "lecture directe" .....	14
4.1.2.1 Méthode de la jauge $\beta$ .....	14
4.1.2.2 Microbalance oscillante (TEOM) .....	15
4.1.3 Méthodes aérodynamiques .....	16
4.2 DISTRIBUTION DIMENSIONNELLE .....	17
4.2.1 Méthodes optiques .....	17
4.2.1.1 Le compteur Optique.....	18
4.2.1.2 Les LIDAR aérosols (en cours de développement) .....	19
4.2.2 Méthodes électriques.....	19
4.2.2.1 Analyseurs de mobilité .....	20
4.2.2.2 Compteurs de noyaux de condensation .....	21
4.2.2.3 Echantillonneur ELPI.....	22
<b>5. APPLICATIONS REGLEMENTAIRES .....</b>	<b>23</b>
5.1 MESURES DANS LE DOMAINE DE L'AIR AMBIANT .....	23
5.2 MESURES DANS LE DOMAINE DE L'HYGIENE INDUSTRIELLE .....	24
5.2.1 Prélèvement de la fraction alvéolaire.....	24
5.2.1.1 Méthode de séparation par cyclone 10 mm .....	24
5.2.1.2 Le capteur individuel de poussières CIP 10 .....	24
5.2.2 Prélèvement de la fraction inhalable.....	24
5.2.2.1 Méthode par filtration.....	24
5.2.2.2 Prélèvement de la fraction inhalable - CIP 10 .....	25
5.2.3 Prélèvement de la fraction thoracique .....	25

5.2.3.1	Méthode par filtration .....	25
5.2.3.2	Prélèvement de la fraction thoracique - CIP 10 .....	25
5.3	APPROCHE MASSIQUE VERSUS APPROCHE EN NOMBRE (LE BIHAN, 2003) .....	25
<b>6.</b>	<b>CONCENTRATIONS DE REFERENCES .....</b>	<b>27</b>
6.1	REGLEMENTATION .....	27
6.2	CONCENTRATIONS UBIQUITAIRES.....	28
<b>7.</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>29</b>
<b>8.</b>	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>35</b>

## **1. INTRODUCTION**

Ce document présente les principales techniques actuellement disponibles pour caractériser les concentrations de particules en suspension dans l'air ambiant.

Il est à destination des acteurs de terrain : laboratoires, bureau d'études, DRIRE qui dans le cadre de leurs activités quotidiennes sont confrontés à la mise en place ou à l'évaluation de ce type d'étude. Sa lecture ne permettra pas de les rendre autonome sur l'ensemble des techniques disponibles, mais contribuera à apporter un éclairage pour les guider en fonction des objectifs recherchés (nature de la caractérisation, résolution temporelle, mobilité et autonomie énergétique...).

Pour plus d'information sur une technique donnée, nous invitons le lecteur à se reporter à l'ouvrage de (Renoux et Boulaud, 1998) que nous considérons comme une référence et dont nous reprenons certains passages dans le chapitre 4 sur les techniques de mesures.

Pour plus d'information vous pouvez prendre contact avec :

– Air ambiant et intérieur :

Olivier Blanchard ([olivier.blanchard@ineris.fr](mailto:olivier.blanchard@ineris.fr))

Olivier Le Bihan ([olivier.le-bihan@ineris.fr](mailto:olivier.le-bihan@ineris.fr))

– Hygiène professionnelle :

Florence Del-Gratta ([florence.del-gratta@ineris.fr](mailto:florence.del-gratta@ineris.fr))





## **2. GENERALITES**

Depuis ces dernières années, la pollution atmosphérique urbaine et son impact sur la santé humaine sont devenus un sujet de préoccupation pour les pouvoirs publics, les chercheurs et le grand public.

Un intérêt grandissant est porté à la composante particulaire de cette pollution et à son évolution du fait de l'augmentation de la contribution des sources mobiles (véhicules diesel) sur la concentration ambiante en particules fines.

L'aérosol atmosphérique est classiquement décrit selon son origine : naturelle ou anthropique. Les sources naturelle sont essentiellement constituées par les océans (embruns marins), l'érosion des sols, les volcans, les feux de forêts et de brousse. Les sources anthropique sont très variées et sont constituées principalement par l'industrie (industries chimiques, cimenteries, industries extractives...), les transports (gaz d'échappement, usure des véhicules, usure de la chaussée...), les combustions (usines et chauffage domestique), l'incinération des déchets (ordures ménagères, déchets industriels et hospitaliers).

La génération d'aérosols peut être de nature primaire (la matière est introduite directement dans l'atmosphère sous forme de particules) ou secondaire (la matière se forme dans l'atmosphère par des processus de transformation des gaz en particules). Parmi les aérosols secondaires d'origine anthropique on peut citer les aérosols provenant de l'oxydation des dérivés gazeux de l'azote et du soufre en nitrates et sulfates particulaires et ceux issus de la conversion de composés organiques volatils.

Les particules atmosphériques sont également caractérisées par leur distribution en taille, leur morphologie et leur composition chimique, elle-même variable selon la taille et l'origine des particules. Leur taille peut varier de quelques nanomètres (nm) à plusieurs dizaines de micromètres ( $\mu\text{m}$ ). En fait lorsqu'on étudie l'aérosol atmosphérique, on s'aperçoit qu'il y a une dichotomie physique entre les fines particules, dont le diamètre est inférieur à  $2 \mu\text{m}$ , et les plus grosses (Madeleine, 1980).

Aujourd'hui, on admet que l'aérosol troposphérique est formé de trois distributions lognormales (Renoux et Boulaud, 1998) :

- le mode "nucléation" défini par les particules dont le diamètre est inférieur à  $0,1 \mu\text{m}$  ; elles sont issues pour l'essentiel de la combustion en moteurs ou bien des processus de conversion gaz-particules,
- le mode "accumulation" constitué des particules dont le diamètre est compris entre  $0,1 \mu\text{m}$  et  $1-2 \mu\text{m}$  ; elles proviennent soit du grossissement de noyaux par condensation, soit de la coagulation de particules du mode "nucléation",
- le mode des "grosses particules" formé par les particules supérieures à  $1-2 \mu\text{m}$  ; ces particules sont formées, pour l'essentiel, à partir de processus mécaniques.

*Nota : le mode des "fines particules" qui regroupe les modes "nucléation" et "accumulation" est également couramment utilisé.*

D'un point de vue métrologique, il conviendra donc de disposer d'échantillonneurs spécifiques et adaptés aux paramètres recherchés (concentration massique, distribution dimensionnelle, composition chimique, etc...). Dans ce contexte, différentes techniques instrumentales ont été développées et continuent à l'être.

### 3. CONVENTIONS GRANULOMETRIQUES

L'ensemble des conventions granulométriques se réfère au diamètre aérodynamique. Il correspond au diamètre d'une particule sphérique de densité égale à 1 g/cm<sup>3</sup> ayant la même vitesse de dépôt que la particule mesurée. Le diamètre aérodynamique permet de quantifier la dimension d'une particule aérienne. Ce diamètre est différent du « diamètre réel » de la particule, il en est de même pour d'autres diamètres propres à certaines techniques de mesures (optiques, électriques...).

#### 3.1 DANS L'AIR AMBIANT

En terme de surveillance de la qualité l'air, la communauté scientifique a adopté des fractions de taille. On distingue principalement les fractions TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>1</sub><sup>(1)</sup>. Ces fractions couvrent des distributions sensiblement différentes de celles décrites précédemment (figure 1). Toutefois, ce sont ces fractions qui ont été retenues comme spécification cible pour les échantillonneurs.

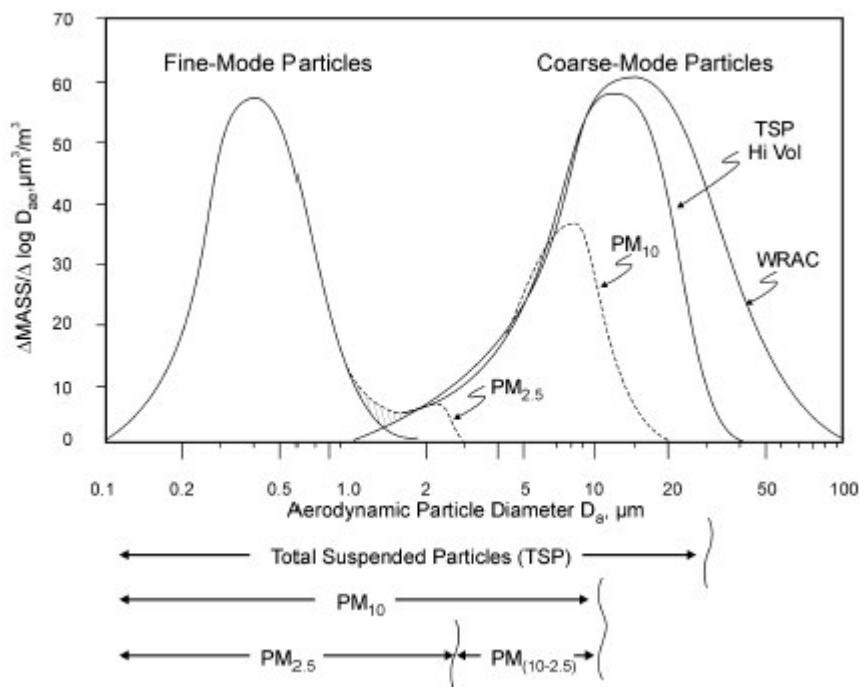


Figure 1 : distribution des fractions de taille des particules dans l'air ambiant (source EPA).

<sup>1</sup> TSP : Particules Totales en Suspension

PM<sub>x</sub> : Particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à x μm.

## 3.2 EN HYGIENE INDUSTRIELLE

Dans le domaine de l'hygiène industrielle, le mesurage des aérosols sert à évaluer un risque pour la santé des personnes exposées et peut également fournir des données utiles aux études épidémiologiques. La comparaison des résultats obtenus à des valeurs limites d'exposition relatives aux substances présentes sert de base à cette évaluation, dans le cadre d'une stratégie de mesurage.

Les aérosols inhalés par l'homme sont fractionnés au cours de la pénétration dans les voies respiratoires. L'efficacité de pénétration est une fonction de nombreux paramètres physiques et physiologiques mais en général elle croît lorsque la dimension des particules décroît. Seule une partie de l'aérosol ambiant « total » est inhalée et seules les particules les plus fines atteignent le poumon profond (Renoux et Boulaud, 1998).

Les particules déposées à différents niveaux de l'appareil respiratoire peuvent provoquer des effets variés sur la santé qui dépendent de leurs propriétés toxicologiques et de leur site de déposition (Fabriès, 1992).

Les conventions de prélèvement utilisées dans le domaine de l'hygiène professionnelle sont différentes de celles adoptées pour l'air ambiant. Elles font référence aux conventions inhalable, thoracique et alvéolaire décrites, en accord avec l'ISO (International Organization for Standardization) et l'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), dans la norme européenne EN 481 et transcrite en norme française X 43-276.

Les définitions de ces fractions sont déduites du fractionnement de l'aérosol dans l'arbre respiratoire. :

- la fraction inhalable qui correspond à la probabilité moyenne d'inhalation, par le nez et par la bouche, des particules en suspension dans l'air. Cette fraction n'est valable que pour des vitesses d'air inférieure à 4 m/s,
- La fraction thoracique qui correspond à la probabilité moyenne de pénétration au-delà du larynx,
- la fraction alvéolaire qui correspond à la probabilité moyenne de pénétration dans les voies aériennes non ciliées (alvéoles).

Ces fractions sont représentées graphiquement en fonction du diamètre aérodynamique sur la figure 2.

*Nota : on peut constater que la convention thoracique est sensiblement identique à la fraction PM10 définie pour la mesure des particules dans l'air ambiant.*

### Conventions de prélèvements des particules

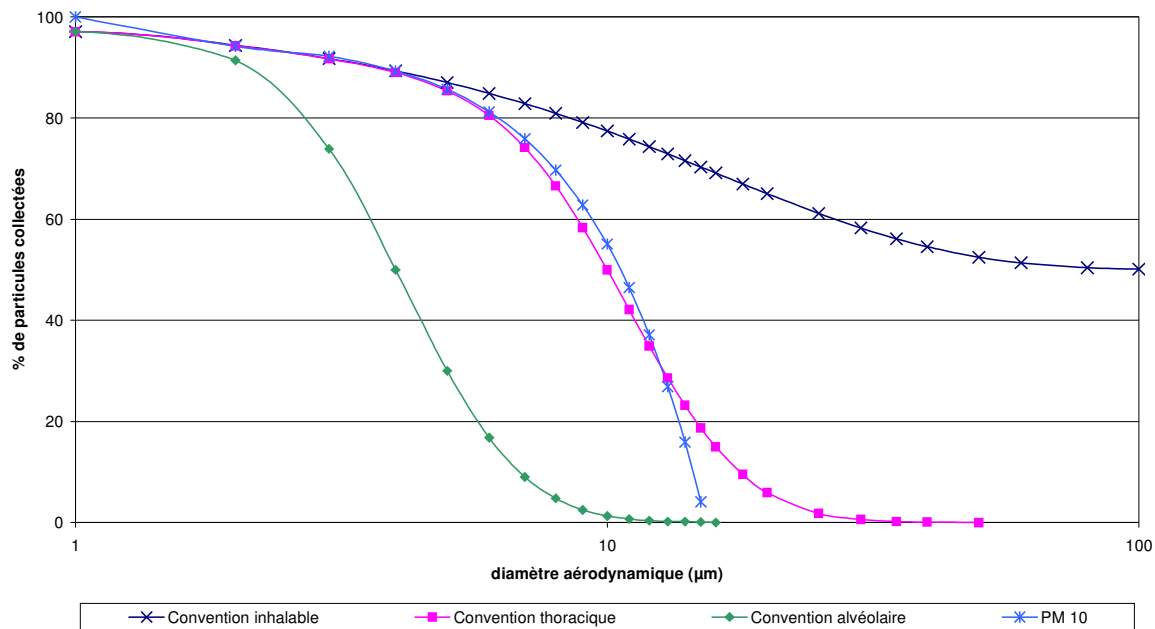


Figure 2 : Distribution des fractions de taille des particules en hygiène industrielle



## 4. METHODES DE MESURES

### 4.1 MESURES EN MASSE

#### 4.1.1 COLLECTION SUR FILTRE

La méthode de collection sur filtre a été particulièrement développée pour la mesure de la concentration massique et de la composition chimique de l'aérosol. Son principe est de recueillir sur un média filtrant un échantillon représentatif de l'aérosol en suspension. L'échantillonneur est généralement composé d'une tête de prélèvement (par exemple un cyclone) qui permet de sélectionner une ou plusieurs granulométries, d'un porte filtre renfermant le média filtrant (filtre), d'un dispositif de mesure du débit et d'un système de pompage (figure 3).

La tête de prélèvement est un dispositif destiné à éliminer du flux d'air échantillonné les particules d'un diamètre (aérodynamique) supérieur au diamètre de coupure du dispositif. Elle peut être utile pour simplement éliminer les insectes ou les gouttes de pluie ou de brouillard indésirables. Une sélection en dimension de l'aérosol peut-être effectuée en interposant, entre l'entrée du dispositif et le filtre de collection, un système spécialement dimensionné pour assurer une classification en taille qui permettra de reproduire une fraction conventionnelle de l'aérosol prélevé. Les systèmes couramment utilisés sont les éluutriateurs, les impacteurs et les cyclones.

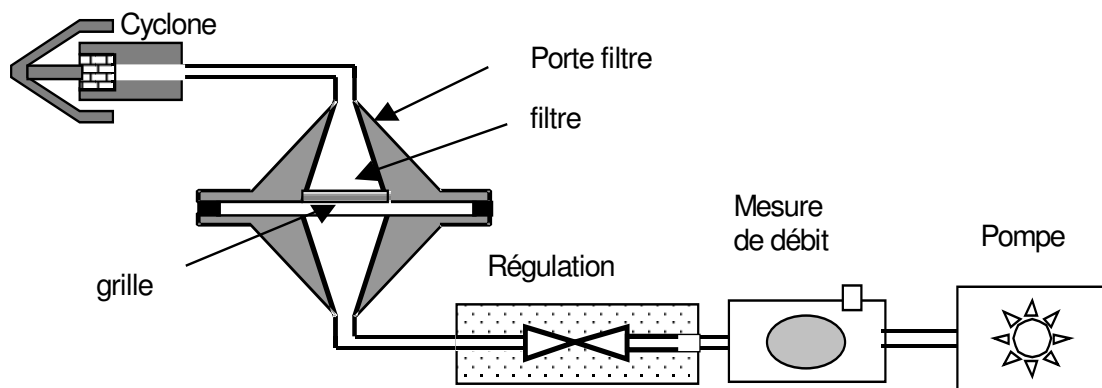


Figure 3 : Schéma des différents éléments d'un dispositif de collection par filtration

Il existe un choix important de médias filtrants pour la mesure des aérosols. Les paramètres à prendre en compte lors de l'échantillonnage reposent principalement sur la méthode d'analyse effectuée a posteriori sur l'échantillon prélevé. D'autres paramètres, comme l'efficacité de collecte, la perte de charge et les contraintes de coût sont également à prendre en considération.

Les analyses ultérieures sont généralement gravimétriques (détermination de la masse collectée par pesée). Cependant, des analyses plus fines peuvent parfois être effectuées (par exemple par spectroscopie de fluorescence X pour les métaux), afin de connaître la composition chimique des particules recueillies, ou bien encore par microscopie optique ou électronique, afin d'obtenir des observations sur leur taille ou sur leur morphologie.

### **Artéfacts sur le média-filtrant**

Les principaux problèmes liés à l'utilisation des filtres résident dans l'occurrence d'artéfacts d'échantillonnage positifs (espèces gazeuses piégées dans le filtre) et négatifs (espèces particulières volatilisées). Par exemple, il est démontré que jusqu'à 100% du nitrate d'ammonium peut être volatilisé à la surface de filtres en Téflon ou en quartz à des températures supérieures à 25 °C (Chow, 1993). Les pertes ne concernent pas uniquement les nitrates, Witz (1990) rapporte une perte de nitrates, de chlorures et d'ammonium respectivement de 19 %, 65 % et 51 % pour des filtres en quartz stockés une semaine avant leur analyse. A l'opposé, les filtres en cellulose (ou dérivés) sont susceptibles d'absorber l'acide nitrique et le dioxyde de soufre. Eatough et al. (1993) ont également montré que des artéfacts positifs et négatifs importants affectent l'échantillonnage du carbone organique (OC) sur des filtres en quartz. Sachant que les composés organiques et le nitrate d'ammonium représentent à eux deux environ 50% de la masse d'aérosol (en milieu urbain ou peri-urbain). Des dispositifs existent pour limiter et/ou évaluer les artéfacts de prélèvement des inorganiques, principalement le nitrate d'ammonium. Il s'agit de placer une série de dénudeurs en amont du filtre et un filtre absorbant en aval (par ex. un filtre en Nylon pour HNO<sub>3</sub>). Le dénudeur piège les espèces gazeuses susceptibles d'être absorbées par le filtre, et l'absorbant recueille les espèces particulières évaporées du filtre. Pour les composés organiques, des solutions ont été proposées mais des recherches sont encore nécessaires dans ce domaine.

### **4.1.2 ECHANTILLONNEURS GRAVIMÉTRIQUES EN CONTINU À "LECTURE DIRECTE"**

Pour ce type d'échantillonneur, l'échantillonnage et l'analyse sont effectués directement par l'instrument et la mesure de la concentration massique est obtenue quasiment en temps réel.

#### **4.1.2.1 MÉTHODE DE LA JAUGE $\beta$**

La méthode de mesure de la concentration des particules dans l'air ambiant, au moyen d'un dispositif basé sur l'absorption des rayons  $\beta$  par la matière (Willeke and Baron, 1993) est définie par la norme AFNOR NF X43-017. Le principe repose sur l'absorption des rayons  $\beta$  de faible énergie par la matière, adsorption qui est quasiment proportionnelle à la masse de matière traversée, avec un coefficient qui varie peu en fonction de la nature des particules collectées à l'exception des éléments très lourds. La réduction de l'intensité du faisceau incident est connue sous le nom d'atténuation du rayonnement  $\beta$ .

La mesure est effectuée automatiquement avant et après formation du dépôt de poussières prélevées dans l'air ambiant et collectées sur un ruban filtre.



La masse de poussières déposées est une fonction du rapport du premier comptage sur le second :

$$M = K.Ln \frac{N_1}{N_2}$$

où N1 représente la mesure sur le filtre avant dépôt,

N2 celle après dépôt,

K le coefficient d'absorption massique pour le rayonnement  $\beta$  déterminé lors de l'étalonnage.

La méthode de la jauge  $\beta$  peut être affectée par des artefacts ; par exemple le tube d'adduction (destiné à véhiculer jusqu'au filtre les matières particulaires prélevées) étant chauffé, il peut conduire à une perte des composés les plus volatils et donc à une sous-estimation des résultats.

#### 4.1.2.2 MICROBALANCE OSCILLANTE (TEOM)

Le TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) développé par Rupprecht & Patashnick est composé d'une microbalance utilisant un élément conique oscillant à sa fréquence naturelle, et d'un microprocesseur. Les particules aspirées au moyen d'une pompe de prélèvement sont déposées sur le filtre disposé en haut du cône et en augmentant la masse du système, elles produisent une décroissance de la fréquence naturelle de vibration (Patashnick and Rupprecht., 1991). Cette variation de fréquence est enregistrée en continu et convertie en variation de masse par le microprocesseur.

Dans ce système de balance, la fréquence d'oscillation obéit à l'équation suivante :

$$f = \sqrt{K / M}$$

où f est la fréquence exprimée en Hz,

K est une constante propre à l'élément oscillant,

M est la masse.

La variation de la masse correspondant au changement de fréquence.

Dans certaines conditions, il a été observé que les concentrations massiques mesurées par l'analyseur TEOM pouvaient être significativement plus faibles que celles mesurées par la méthode de référence pour l'air ambiant (filtration, cf. § 5.1). De nombreuses études attribuent principalement la divergence des résultats à la volatilisation importante d'espèces particulaires semi-volatils dans le TEOM (Green et al., 2001; Muir, 2000; APEG, 1999; Allen, 1997). En effet, dans sa configuration standard, le TEOM collecte un aérosol sur un filtre chauffé à 50°C ce qui peut expliquer en partie la perte, par évaporation, des composés les plus volatils, comme le nitrate d'ammonium et comme certains composés organiques.

Le TEOM équipé du système FDMS R&P 8500 (Filter Dynamics Measurement System) a été développé par Rupprecht & Patashnick dans le but de quantifier les fractions particulaires volatile et "non volatile". Ce système a été évalué par

### 4.1.3 MÉTHODES AÉRODYNAMIQUES

Les méthodes fondées sur les propriétés aérodynamiques des particules ont été développées principalement pour collecter les particules en vue d'une analyse ultérieure ou pour une classification en dimension.

Les dispositifs les plus largement utilisés et étudiés sont les impacteurs dont le principe est fondé sur les propriétés d'inertie des aérosols. Ces systèmes se basent sur le fait que les particules ayant une inertie supérieure à une certaine valeur limite ne suivent pas les lignes de courant de l'air échantillonné. Tout dispositif d'impaction est caractérisé par sa courbe d'efficacité. Elle représente l'efficacité de l'impacteur à répondre à un nombre de Stokes donné. Un étage d'impaction est constitué d'un ajustage dirigeant un jet d'air à haute vitesse contre une surface solide. On aura alors une impaction des particules supérieures à un certain diamètre de coupure. Chaque étage comportera donc une buse d'entrée et une surface d'impact, comme le montre la figure ci-dessous.

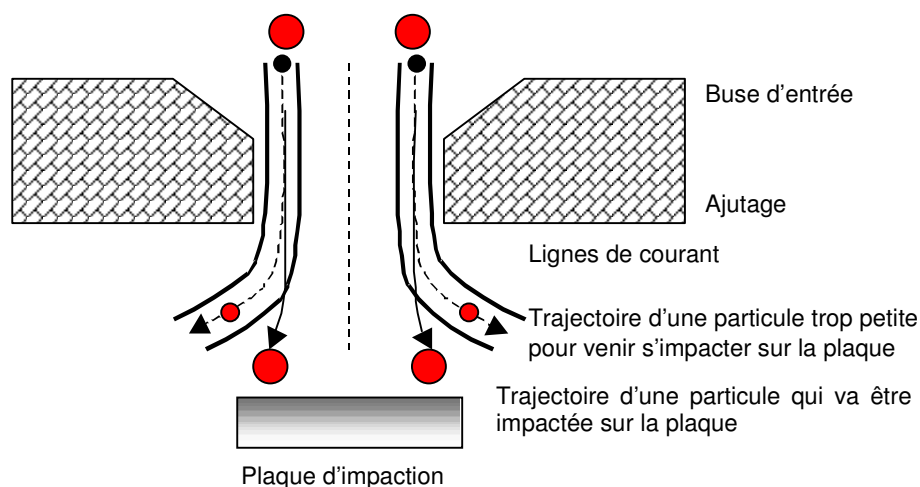


Figure 4 : Schéma de principe d'un étage d'impacteur (Renoux et Boulaud, 1998).

Les aérosols sont aspirés au travers de la buse. Les particules ayant une taille supérieure au diamètre de coupure vont entrer en collision avec la plaque ; les autres, de diamètre plus petit et de vitesse plus élevée, vont continuer leur trajectoire jusqu'aux étages suivants (figure 5).

<sup>2</sup> [http://www.lcsqa.org/rapport/rap/prog2003/ineris/Etude9\\_883.pdf](http://www.lcsqa.org/rapport/rap/prog2003/ineris/Etude9_883.pdf)

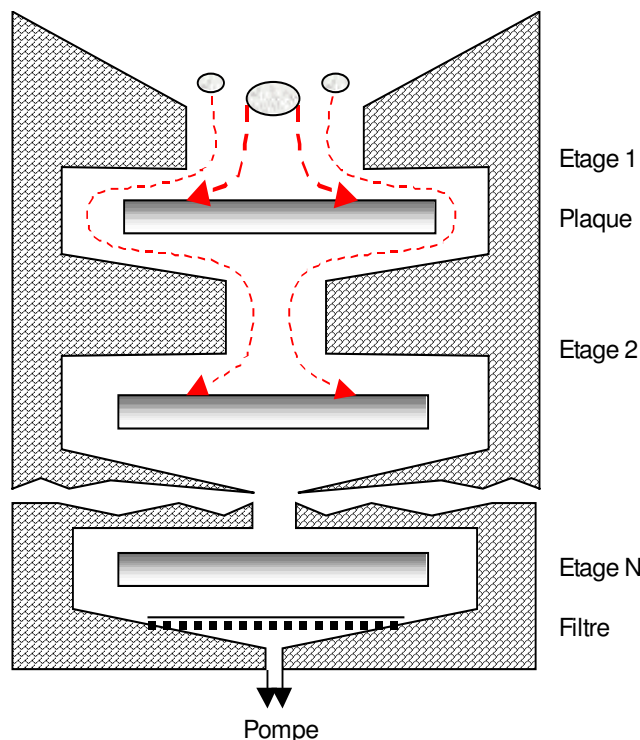


Figure 5 : Schéma de principe d'un impacteur en cascade (Renoux et Boulaud, 1998).

Les impacteurs permettent un échantillonnage plus spécifique que celui effectué par les autres systèmes en raison de leurs diamètres de coupure extrêmement précis. Classiquement, les gammes dimensionnelles prélevées vont de quelques dixième de  $\mu\text{m}$  à  $50 \mu\text{m}$  et permettent une séparation pouvant aller, pour les impacteurs commerciaux, jusqu'à 12 gammes de diamètre.

Il existe plusieurs types d'impacteurs en cascade; la plupart peuvent être sujets au phénomène de rebond des particules sur les substrats d'impaction qui deviennent très critiques dans des conditions de faible humidité relative pour des particules peu "collantes" (particules de poussière minérale par exemple). Une fraction importante de ces particules peut aussi être perdue sur les parois de l'impacteur. Du fait de la pression réduite dans les étages des impacteurs collectant les plus petites particules, il existe aussi un risque de volatilisation des espèces particulaires les plus volatiles.

## 4.2 DISTRIBUTION DIMENSIONNELLE

De nombreuses techniques permettant de mesurer la distribution dimensionnelle des aérosols ont été développées. Elles font appel aux différentes propriétés des aérosols (optique, électrique et aérodynamique ...).

### 4.2.1 MÉTHODES OPTIQUES

Les aérosols sont, d'une manière générale, difficiles à quantifier de manière précise par techniques optiques car les interactions particules/lumières dépendent de beaucoup de paramètres.

Les méthodes optiques font appel aux lois de diffusion de la lumière par les particules. Lorsqu'un faisceau lumineux traverse un volume de gaz contenant des particules en suspension, il subit une absorption et une diffusion. La quantité de lumière absorbée ou diffusée va être fonction de la concentration en particules. Différentes techniques ont été développées sur des méthodes dans l'axe (la microphotographie, l'ombroscopie, l'holographie, mais surtout l'extinction, la diffraction et la rétrodiffusion) et des méthodes hors axes (compteurs optiques et vélocimètres Doppler). Nous nous intéresserons particulièrement aux compteurs optiques qui sont le plus couramment utilisés ainsi qu'aux nouvelles techniques de mesure à long trajet optique de type LIDAR.

#### 4.2.1.1 LE COMPTEUR OPTIQUE

Le compteur optique de particules est basé sur la mesure de l'intensité diffusée par une particule. Un faisceau laser est focalisé sur un volume de mesure à travers lequel les particules en suspension passent une par une. La quantité de lumière diffusée à un angle  $\beta$ , est alors mesurée par un détecteur (figure 6). Des algorithmes sont ensuite utilisés afin d'obtenir la taille de la particule connaissant son spectre de diffusion angulaire.

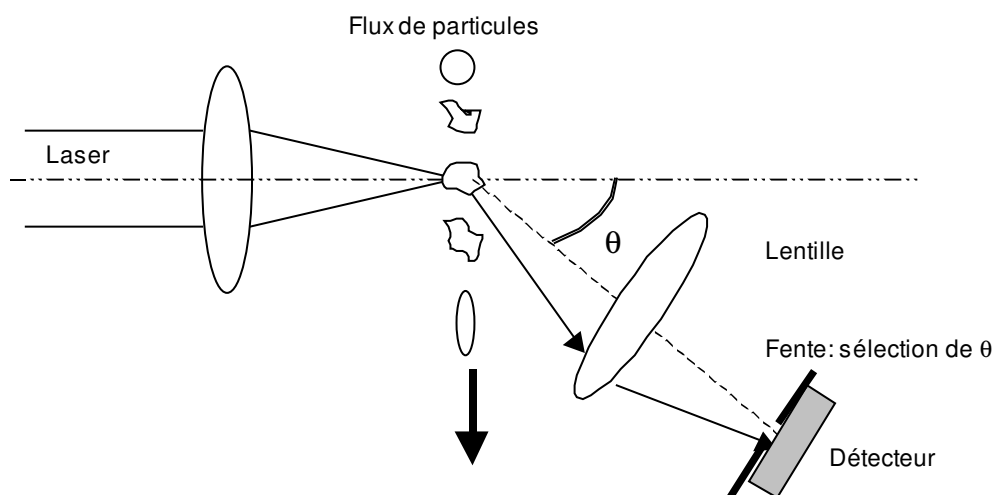


Figure 6 : Schéma du principe de mesure d'un compteur optique

Calibrés sur la base de particules sphériques d'indice de réfraction similaire à celui de l'eau pure, les mesures de compteurs de particules peuvent se révéler problématiques dans le cas de particules non-sphériques, pour des particules absorbant la lumière ou pour une population d'aérosols dont l'indice de réfraction n'est pas homogène. Des corrections à certains de ces problèmes sont possibles mais sont très rarement appliquées. Les diamètres mesurés sont donc des diamètres "optiques" qui ne sont pas linéairement proportionnels aux diamètres géométriques ou aérodynamiques. Enfin, les limites de détection en taille et l'efficacité de la mesure données par les constructeurs sont souvent très optimistes. Le domaine de dimension couvert par ces dispositifs est compris entre 0,1 à plusieurs dizaines de  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2.1.2 LES LIDAR AÉROSOLS (EN COURS DE DÉVELOPPEMENT)

Comme toutes les techniques optiques d'analyse, la mesure LIDAR repose sur la connaissance précise de la signature optique des espèces présentes dans l'atmosphère.

Faute de connaissance dans ce domaine, la grande majorité des LIDAR actuels ne fournit qu'une évaluation qualitative des aérosols, au travers de l'extinction ou de la visibilité atmosphérique et d'une première ébauche de caractérisation en évaluant le taux de particules sphériques présentes dans l'atmosphère par l'analyse du rapport de dépolarisation.

Néanmoins, bien que reposant sur une analyse qualitative, ces instruments permettent de fournir en continu une documentation fine de la stratification atmosphérique et de sa dynamique. De ce fait, ils sont largement utilisés afin de fournir un suivi de la hauteur de la couche limite atmosphérique, une évaluation du bilan radiatif, voire de l'identification de certains paramètres météorologiques comme les zones de pré-condensation susceptibles d'influencer fortement la nébulosité. Enfin, des études sont actuellement engagées, visant à coupler ces instruments, devenus très opérationnels, à des outils de modélisation multi-échelles, afin de fournir une information en continu sur la nébulosité présente dans toute la colonne atmosphérique et, à terme, de prendre en compte précisément l'action des aérosols dans les outils de modélisation physico-chimiques.

Par ailleurs, plusieurs études récemment engagées ont fourni des premiers résultats encourageants sur la caractérisation quantitative des aérosols atmosphériques. Dans un premier temps elles ont été appliquées à la caractérisation des nuages stratosphériques polaires et à leur action sur le "trou d'ozone", et plus récemment ces études ont porté sur les aérosols troposphériques et urbains. Des modèles d'interaction lumière-matière ont été développés pour des particules non sphériques (sphéroïdes, fractales,...), qui ont permis de confirmer une forte dépendance en longueur d'onde de la réponse optique des particules.

#### 4.2.2 MÉTHODES ÉLECTRIQUES

La charge électrostatique des particules est une des propriétés importantes des aérosols. La plupart des particules portent des charges électriques, qu'elles soient produites naturellement ou artificiellement. Si ces particules sont soumises à l'influence d'un champ électrique, la force exercée sur elles peut devenir prépondérante. Si l'on considère que les forces de gravité et l'inertie des particules ainsi que les phénomènes de diffusion brownienne sont négligeables, le mouvement des particules est alors déterminé par la vitesse du fluide porteur, et la vitesse limite de dérive due au champ électrique (Renoux et Boulaud, 1998).

Généralement, les méthodes fondées sur les propriétés électriques des aérosols peuvent être caractérisées par quatre étapes successives :

- le marquage des particules, qui consiste à fixer sur les particules une ou plusieurs charges électriques, de façon à leur conférer une mobilité électrique qui deviendra le paramètre à déterminer. L'utilisation d'une source radioactive est généralement requise pour cette opération,
- la séparation et la sélection des particules, reposant sur leur propriété de mobilité électrique,

- la détection des particules,
- l'inversion des données, permettant de déterminer la répartition granulométrique à partir de la distribution basée sur la propriété étudiée.

#### 4.2.2.1 ANALYSEURS DE MOBILITÉ

Il existe différentes catégories d'analyseur de mobilité qui peuvent être utilisées pour la mesure des ions ou des particules chargées. L'Analyseur Différentiel de Mobilité Electrique (ADME) ou « Differential Mobility Analyser » (DMA) en anglais, est la version la plus perfectionnée des compteurs à ions.

Ce système a conduit à la réalisation d'un ADME à écoulement axial qui a été ensuite commercialisé par la société TSI sous le nom de DMPS (Differential Mobility Particle Sizer) (figure 7), et de SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) pour sa version automatisée.

L'aérosol est porté à l'équilibre de Boltzmann par passage dans un nuage d'ions bipolaires créé par une source radioactive de Krypton 85. Il entre ensuite à la périphérie du tube extérieur et il est distribué d'une façon régulière sur tout son pourtour. L'air filtré pénètre dans l'analyseur le long de l'électrode centrale et contraint le débit d'air contenant l'aérosol à rester le long de l'électrode externe.

L'aérosol circule de haut en bas, les particules chargées positivement sont attirées vers l'électrode centrale portée à un potentiel négatif. Les particules ayant un domaine de mobilité étroit, correspondant aux paramètres de fonctionnement définissant la trajectoire des particules, passeront au travers des orifices placés à la base de l'électrode centrale. Une mesure de concentration de ces particules sélectionnées est alors effectuée soit en utilisant un Compteur de Noyaux de Condensation (CNC), soit un électromètre. Le domaine de dimensions couvert par ce dispositif est compris entre 0,01 à 1  $\mu\text{m}$  avec un très bon pouvoir de résolution.

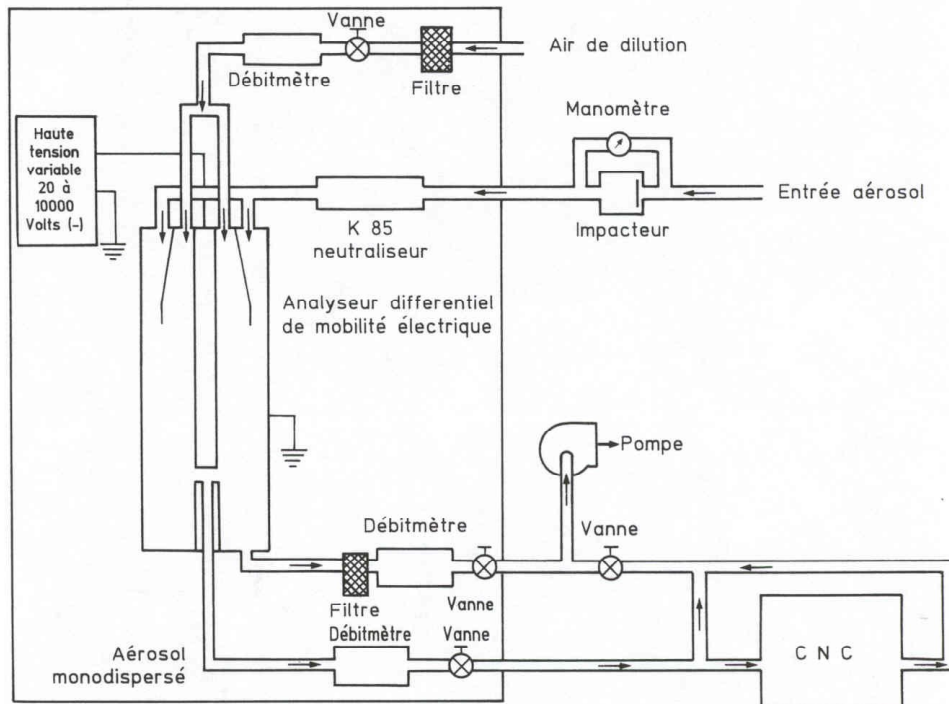


Figure 7 : Schéma d'un DMPS constitué d'un ADME et d'un CNC

Pour surmonter cet inconvénient, Wang et Flagan (1990) ont proposé une méthode par balayage continu de tension (scanning) ce qui permet de scruter chaque classe de mobilité en continu et non plus "pas à pas". L'évolution porte essentiellement sur le logiciel d'inversion des données qui doit tenir compte du fait que les particules de mobilité,  $Z$ , extraites au temps  $t$ , ne seront détectées dans le CNC qu'au temps  $t + dt$ ,  $dt$  représentant le temps de transfert de cette population entre l'analyseur et le détecteur. Le gain en temps devient appréciable car une granulométrie est obtenue avec une scrutation de 30 secondes. Ce dispositif a été commercialisé par la Société TSI sous le nom de SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer). L'utilisation des instruments en SMPS peut conduire à des différences avec un DMPS aux deux extrémités du domaine de tension balayé. La résolution temporelle de ces techniques est comprise entre 3 minutes et trente secondes.

#### 4.2.2.2 COMPTEURS DE NOYAUX DE CONDENSATION

L'idée de faire grossir les particules atmosphériques par condensation de vapeur d'eau sursaturée de façon à pouvoir les détecter avec un microscope optique a été mise en œuvre pour la première fois par Coulier en 1875 puis par Aitken en 1888. A partir de ces travaux, on développera les Compteurs de Noyaux de Condensation (CNC) dont la conception évoluera tout au long du 20ème siècle pour aboutir à différents types qui varient dans la façon d'induire la sursaturation et de détecter les particules ayant grossi (voir exemple sur la figure ci-dessous). Les compteurs de particules disponibles aujourd'hui permettent de détecter avec une efficacité supérieure à 90% les particules dont le diamètre est supérieur à 5 nm et avec une efficacité supérieure à 50% les particules de 3 nm.

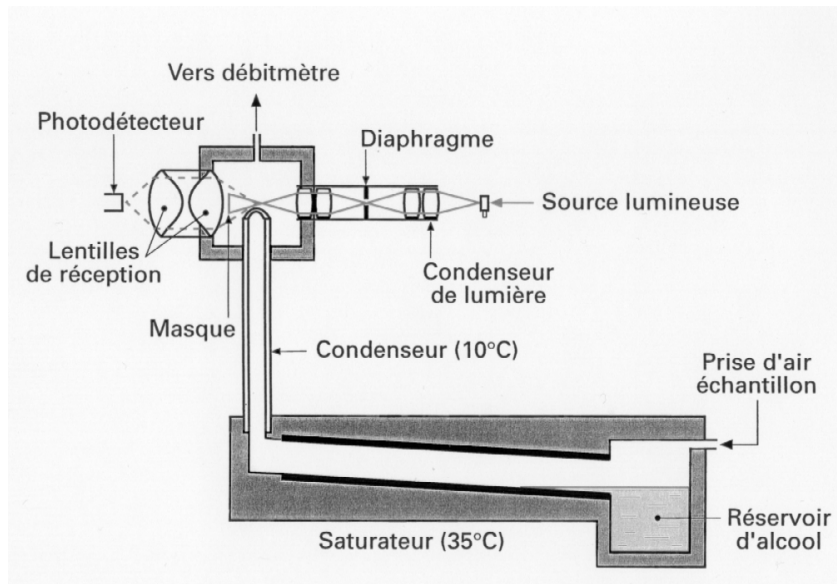


Figure 8 : Schéma du compteur de particules TSI 3020

#### 4.2.2.3 ECHANTILLONNEUR ELPI

Un système de mesure de la granulométrie par impaction (ELPI-Electrical Low Pressure Impactor), a été développé sur la base des impacteurs en cascade déjà commercialisés. Les particules sont chargées en entrée de l'impacteur et un électromètre enregistre les charges induites sur chacun des étages lors de l'impaction des particules. Le signal est alors analysé et inversé pour avoir accès à la granulométrie, de 15 nm à 10 µm. Un programme d'acquisition permet en outre de pouvoir visualiser, en temps réel, les distributions en nombre, en volume et en masse de particules. Facile d'utilisation, l'ELPI est un instrument de mesure adapté à une détermination globale du spectre dimensionnel.



## **5. APPLICATIONS REGLEMENTAIRES**

### **5.1 MESURES DANS LE DOMAINE DE L'AIR AMBIANT**

Sur le plan réglementaire, les recommandations en terme de surveillance des concentrations particulières dans l'air ambiant sont définies par la directive européenne 1999/30/CE du 22 avril 1999. Elle recommande la mesure de la concentration en masse des PM10 et des PM2.5. La méthode de référence pour l'échantillonnage et la mesure des PM10 est basée sur la méthode de collection par filtration avec analyse par gravimétrie. Elle est définie au point IV de l'annexe IX de la directive et fait référence à la méthode décrite dans la norme EN 12341.

Trois systèmes d'échantillonnage de référence ont été retenus :

- un système à faible volume: échantillonneur LVS- PM10, fonctionnant à un débit constant de  $(2,3 \pm 2 \%) \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- un système à gros volume: échantillonneur HVS- PM10, fonctionnant à un débit constant de  $(68 \pm 2 \%) \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- un système à très gros volume: échantillonneur WRAC- PM10, fonctionnant à un débit total de  $1966 \text{ m}^3/\text{h}$ , avec un débit constant de l'étage PM10 de  $(77,9 \pm 2 \%) \text{ m}^3/\text{h}$ .

La mesure des PM2.5 est également recommandée par la directive, bien que la méthode européenne de référence pour l'échantillonnage et la mesure des PM2.5 soit encore en préparation (CEN/TC 264 WG 15).

Aujourd'hui, deux autres méthodes sont largement utilisées sur le territoire français par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air pour la mesure des concentrations de PM10 et PM2.5 : les méthodes par absorption de rayons  $\beta$  (jauge  $\beta$ ) et de la microbalance oscillante (TEOM). Cette dernière technique représente 70% du taux d'équipement pour la mesure des PM10 et 100% pour la mesure des PM2.5.

En effet, la directive indique que : « les Etats membres peuvent également utiliser toute autre méthode dont ils peuvent prouver qu'elle donne des résultats équivalents à ceux de la méthode susvisée, ou toute autre méthode dont l'Etat membre concerné peut prouver qu'elle présente un rapport constant avec la méthode de référence. Dans ce cas, les résultats obtenus par la méthode doivent être corrigés par un facteur approprié pour produire des résultats équivalents à ceux qui auraient été obtenus en utilisant la méthode de référence ».

## **5.2 MESURES DANS LE DOMAINE DE L'HYGIENE INDUSTRIELLE**

### **5.2.1 PRÉLÈVEMENT DE LA FRACTION ALVÉOLAIRE**

#### **5.2.1.1 MÉTHODE DE SÉPARATION PAR CYCLONE 10 MM**

Le prélèvement de la fraction alvéolaire par cette technique est décrit dans la norme NF X 43-259.

La tête de prélèvement composée d'un support porte filtre est associée à un cyclone dont l'intérêt est de séparer les particules par des forces d'inertie centrifuge pour ne récolter sur le filtre que les particules correspondant à la fraction alvéolaire. Cet ensemble qui constitue la tête de prélèvement est raccordé par un tuyau flexible à une pompe portable d'un débit nominal de 1,7 l/min.

#### **5.2.1.2 LE CAPTEUR INDIVIDUEL DE POUSSIÈRES CIP 10**

Le prélèvement de la fraction alvéolaire par la méthode de la coupelle rotative est décrit dans la norme NF X 43-262.

Le CIP 10 (Capteur Individuel de Poussières d'un débit nominal de 10 litres/minute) est un appareil autonome de petites dimensions destiné à la mesure de la concentration des poussières en suspension dans l'atmosphère. L'appareil se présente sous la forme d'un bloc compact, composé de deux parties :

- une tête de prélèvement (partie supérieure) équipée d'un chapeau protecteur des orifices d'entrée d'air et des moyens de sélection des particules à mesurer,
- un boîtier (partie inférieure) renfermant les éléments de fonctionnement : batteries et prise de recharge, moteur, interrupteur magnétique, circuits électroniques.

La technique de fonctionnement du CIP 10, est basée sur la méthode par impaction sur mousse rotative. Cette technique consiste à aspirer l'air chargé en particules en faisant tourner une mousse de polyuréthane à cellules ouvertes à grande vitesse et à capter ces particules dans cette même mousse. La coupelle rotative a donc deux propriétés, celle de ventilateur par entraînement de l'air et celle de collecteur des particules.

### **5.2.2 PRÉLÈVEMENT DE LA FRACTION INHALABLE**

#### **5.2.2.1 MÉTHODE PAR FILTRATION**

Le prélèvement de la fraction inhalable par la technique de filtration est décrit dans la norme NF X 43.257.

A l'inverse de la méthode de séparation par cyclone, le prélèvement de la fraction inhalable est réalisé en utilisant une tête de prélèvement constitué uniquement d'un système porte-filtre dont le diamètre d'ouverture est égal à  $4,1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ . Les particules prélevées sont directement collectées sur le filtre sans séparation préalable.

Le système porte filtre est raccordé par un tuyau flexible à une pompe portable d'un débit nominal de 1 litre/minute.

### 5.2.2.2 PRÉLÈVEMENT DE LA FRACTION INHALABLE - CIP 10

Le prélèvement de la fraction inhalable par la méthode de la coupelle rotative n'est aujourd'hui décrit par aucune norme.

Cependant, des travaux menés à l'Institute of Occupational Medicine (IOM) d'Edinburgh ont montré que le CIP 10 était dans cette configuration apte à sélectionner et mesurer cette fraction, moyennant une adaptation du sélecteur. Cette adaptation consiste à remplacer les étages supérieurs composés des différentes mousses par un cône approprié.

### 5.2.3 PRÉLÈVEMENT DE LA FRACTION THORACIQUE

#### 5.2.3.1 MÉTHODE PAR FILTRATION

Le prélèvement de la fraction thoracique par la technique de filtration est décrit dans la norme NF X 43.050.

La sélection des particules est assurée par huit orifices cylindriques de 1,6 mm de diamètre distribués sur un cône en acier inoxydable. Les particules les plus grossières sont impactées sur la surface externe du cône. Le débit de fonctionnement est de 7 l/min.

#### 5.2.3.2 PRÉLÈVEMENT DE LA FRACTION THORACIQUE - CIP 10

Le prélèvement de la fraction thoracique par la méthode de la coupelle rotative n'est aujourd'hui décrit par aucune norme.

Cependant, les études menées à l'INERIS et à l'Institut National de Recherche et de Santé (INRS) ont montré que le CIP 10 était également, moyennant une adaptation du sélecteur, apte à sélectionner et mesurer cette fraction.

### 5.3 APPROCHE MASSIQUE VERSUS APPROCHE EN NOMBRE (LE BIHAN, 2003)

Il est essentiel de noter que la concentration en masse, et donc les structures de surveillance actuelles, sont avant tout influencées par les grosses particules.

En effet, la masse ou le volume pour une particule sphérique est proportionnelle au cube du rayon ou du diamètre. Une particule de  $10^{-1}$   $\mu\text{m}$  a un volume ou une masse un million de fois plus faible qu'une particule de 10  $\mu\text{m}$ . Il sera donc difficile de mesurer sa masse en présence de particules de 10  $\mu\text{m}$  (Fontan, 2002).

Réciproquement, en site pollué, le nombre de particules de 10  $\mu\text{m}$  est très faible comparé à celui des particules de 0,1  $\mu\text{m}$ . Les mesures en nombre ne permettent pas en général de les prendre en compte (Fontan, 2002) (au minimum 70 à 80% des particules sont inférieures à 100 nm (Putaud, 2003)).

La mesure seule de la masse d'un aérosol ou celle uniquement du nombre de particules ne permet pas en général, et en particulier en site pollué, de représenter correctement l'ensemble du spectre granulométrique d'un aérosol polydispersé (Fontan, 2002).

Une étude récente (Putaud, 2003) portant sur un ensemble de stations de mesure européennes, montre qu'il n'existe pas de corrélation « universelle »

entre d'une part les mesures PM, et d'autre part la concentration en nombre ( $D > 10 \text{ nm}$ ) : si la corrélation est bonne en site « propre », elle se dégrade en site pollué.

## **6. CONCENTRATIONS DE REFERENCES**

### **6.1 REGLEMENTATION**

#### ***Air ambiant***

Directive 1999/30/CE du conseil du 22 avril 1999

Valeurs limites devant être respectées au 1er janvier 2005 :

- 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM10 sur 24h, à ne pas dépasser plus de 35 fois par an.
- 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM10 sur l'année civile.

Seconde phase pour le 1er janvier 2010.

- 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM10 sur l'année civile.

#### ***Hygiène professionnelle***

Une synthèse de l'INRS [14] regroupe les différents agents pour lesquels le ministère chargé du Travail a publié des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP), que ces valeurs soient indicatives (VL) ou réglementaires (VR).

Les valeurs limites comportent deux catégories :

1. les poussières sans effet spécifique (fraction inhalable et fraction alvéolaire),
2. les poussières faisant l'objet d'une VLEP particulière, à savoir notamment : silices cristallines, amiante, poussières de grain de plomb, aérosols très fins (fumées) tels ceux de soudage ou de décapage thermique...

Prenons l'exemple du cas général (poussières sans effet spécifique), traité dans le Décret du 7 décembre 1984, article R.232-5-5 du Code du travail. Les concentrations moyennes en poussières inhalables et alvéolaires de l'atmosphère inhalée par une personne, évaluées sur une période de 8 heures, ne doivent pas dépasser respectivement 10 et 5  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  d'air.

#### ***RGIE***

Le RGIE est le Règlement Général des Industries Extractives. Il a été institué le 7 mai 1980, et complété par le décret 94.784 du 2 septembre 1994. Le titre « Empoussiérage » a pour objet de prévenir les risques de pneumoconiose à poussières mixtes et notamment le risque de silicose.

La concentration en poussières inhalables et la concentration en poussières alvéolaires siliceuses sont suivies. Les notions de fraction « inhalable » et de fraction « alvéolaire » sont déterminées par la norme NF-EN-481.

Le suivi de la fraction alvéolaire prend en compte à la fois la concentration massique et le taux de quartz.

## 6.2 CONCENTRATIONS UBIQUITAIRES

<b>Environnement</b>	<b>Naturel</b> (distance >50 km de source importante)	<b>Rural</b> (distance comprise ne 10 et 50 km de source importante)	<b>Péri-urbain</b> (distance comprise entre 3 et 10 km de source importante)	<b>Urbain</b> (axe routier <2500 véhicules/jour dans un rayon de 50m)	<b>Proche trafic</b> (trottoir)
PM2.5	5	10-15	20-25	20-35	25-35
PM10	5-15	10-25	25-40	25-45	40-50

*Tableau 1 : Concentration moyenne annuelle mesurées en Europe (Van Dingenen R. et al., 2004) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )*

## **7. CONCLUSION**

L'implication des aérosols dans la pollution atmosphérique et la santé est largement reconnue et étudiée depuis longtemps dans l'air extérieur comme dans l'air des locaux de travail ou d'habitation.

Des réglementations visent à limiter les concentrations, notamment dans l'air extérieur et des locaux de travail. Leur caractérisation repose sur des conventions et des méthodes différentes (PM10, fraction alvéolaire...) qui conduisent à des résultats qui ne sont pas forcément comparables.

L'étude des aérosols nécessite la caractérisation de nombreux paramètres : répartition granulométrique, évolution temporelle des concentrations, composition chimique, nombre.... qui détermineront le choix des techniques de prélèvement à utiliser dans la stratégie de mesure.

Méthode	Technique d'échantillonnage	Technique d'analyse	Logistique	Coût	Complexité	Résultats de mesure
Filtration Petit volume (1 à 10 litres /minute).	Un volume d'air est aspiré au travers d'une membrane filtrante. Durée d'échantillonnage de 24 heures à une semaine. En fonction de la fraction granulométrique d'intérêt, différentes têtes de prélèvements peuvent être utilisées (TSP, PM10, PM2.5) ou d'impacteurs en cascade.	<b>1<sup>er</sup> niveau</b> La masse de particules collectée est déterminée par pesée différentielle avant et après le prélèvement. <b>2<sup>ème</sup> niveau</b> Possibilité de réaliser des analyses physico-chimique sur les particules piégés sur le filtre ou les différents étages des impacteurs.	Systèmes portables possible (batterie). Autonomie : 8 à 24 heures.	€	+	Pas de mesure en continu <b>1<sup>er</sup> niveau</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$ <b>2<sup>ème</sup> niveau</b> composition chimique granulométrie
Filtration Moyen (2 à 15 m <sup>3</sup> /h) et grand (>15 m <sup>3</sup> /h) volumes.	Un volume d'air est aspiré au travers d'une membrane filtrante. Durée d'échantillonnage de quelques heures à une semaine. Existe des systèmes permettant des prélèvements séquentiels automatiques. En fonction de la fraction granulométrique d'intérêt, différentes têtes de prélèvements peuvent être utilisées (TSP, PM10, PM2.5).	<b>1<sup>er</sup> niveau</b> La masse de particules collectée est déterminée par pesée différentielle avant et après le prélèvement. <b>2<sup>ème</sup> niveau</b> Possibilité de réaliser des analyses physico-chimique sur les particules piégés sur le filtre.	Alimentation électrique nécessaire (220 V) Appareillage lourd et encombrant	€€	++	Pas de mesure en continu <b>1<sup>er</sup> niveau</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$ <b>2<sup>ème</sup> niveau</b> composition chimique granulométrie
Jauge $\beta$	Un volume d'air est aspiré puis projeté sur une bande adhésive déroulante (incrémentés de quelques minutes à 24 heures). En fonction de la fraction granulométrique d'intérêt, différentes têtes de prélèvements peuvent être utilisées (TSP, PM10, PM2.5).	Le niveau d'absorbance au radiation $\beta$ des particules prélevées est mesuré. Le résultat est converti en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .	Alimentation électrique nécessaire (220 V) Appareillage lourd et encombrant	€€	++	Mesure en continu $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Compteur optique	Un volume d'air est aspiré (1 l/min) au travers d'une faisceau lumineux (laser ou infrarouge).	Les particules émettent un rayonnement proportionnel à la taille de la particule. Ce rayonnement est affecté également par la forme, la couleur et l'indice de réfraction de la particule. Les résultats obtenus sont à exprimer en diamètre optique équivalent aux particules utilisées pour la calibration (sable ou polystyrène).	Existent des versions portables ou fixes utilisable en extérieur. Autonomie quelques heures.	€€	++	Mesure en continu <b>1<sup>er</sup> niveau</b> Nombre de particules <b>2<sup>ème</sup> niveau</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (estimation)  Bonne outil qualitatif



Méthode	Technique d'échantillonnage	Technique d'analyse	Logistique	Coût	Complexité	Résultats de mesure
TEOM (Tapering element oscillating microbalance)	Un volume d'air (chauffé à 50°C pour empêcher la condensation) est amené sur un filtre. Le filtre est attaché au-dessus d'un tube de verre conique en vibration. En fonction de la fraction granulométrique d'intérêt, différentes têtes de prélèvements peuvent être utilisées (TSP, PM10, PM2.5).	Les particules collectées sur la surface du filtre réduisent la fréquence de l'oscillation. La fréquence est convertie en masse. Ce système peut-être complété avec une unité de collection de cartouche filtrante si on souhaite réaliser une analyse chimique.	Alimentation électrique nécessaire (220 V) Appareillage lourd et encombrant	€€€	++	Mesure en continu µg/m <sup>3</sup> Pas de temps : 15 minutes
Analyseur de mobilité	Le passage de l'échantillon à travers un neutraliseur permet d'attribuer aux particules une loi de charge précise : seule est chargée une proportion précise de particules. L'échantillon est ensuite injecté dans un cylindre vertical ; un champ électrique horizontal permet d'extraire du flux les particules chargées d'un diamètre précis. La variation progressive de ce champ permet de balayer une large gamme de taille (typiquement 10 à 1 000 nm).	Pour un diamètre donné, une fois extraite, la minorité chargée est dénombrée à l'aide d'une compteur de noyaux de condensation (cf. ci-dessous). L'extraction et le dénombrement appliqués successivement à l'ensemble de la gamme de taille explorée, mènent à la détermination de la distribution en taille.	Outils de recherche, connaissant un développement tout à fait crédible vers l'opérationnel. Utilisés pour le mesure en continu dans plusieurs villes européennes.	€€€	+++	Mesure en continu Nombre de particules Granulométrie 0.01 µm à 1 µm (64 classes) Existence de produits spécifiques à la gamme nanométrique (jusqu'à 0,5 nm).
Compteur de noyaux de condensation	Le principe de ces compteurs consiste à faire condenser du butanol sur les particules submicroniques, les rendant ainsi détectables par un système optique classique.	Une approche émergente consiste à utiliser de l'eau en lieu et place du butanol.	Outils de recherche, en voie d'intégration dans le domaine de la qualité de l'air. Utilisés pour le mesure en continu dans plusieurs villes européennes.	€€€	+++	Mesure en continu Nombre de particules Détection (selon version) de 3 nm à 1100 nm.

Méthode	Technique d'échantillonnage	Technique d'analyse	Logistique	Coût	Complexité	Résultats de mesure
ELPI	L'impaction en cascade consiste à accélérer les particules, puis à provoquer un changement de direction de 90°, entraînant l'impaction des particules de plus grande inertie. La succession d'étages d'accélération de plus en plus importante permet d'avoir accès à une distribution en taille (généralement 10 classes environ).	L'ELPI procède en amont à l'impaction, à une mise en charge des particules. De plus, chaque étage est muni d'un électromètre : la capture de particules est ainsi détectée de manière instantanée.	Outils d'étude et de recherche. Grande dynamique (fréquence d'1 Hz). Par contre, limite au niveau de la composante volatile de l'aérosol.	€€€	+++	Mesure en continu Nombre de particules Granulométrie 0,01 µm à 1 µm voire 10 µm (10 classes environ)
CIP10	Le débit de prélèvement de l'appareil est assuré par la rotation à grande vitesse d'une coupelle garnie de mousse poreuse. Les particules ainsi échantillonnées viennent s'impacter dans la mousse polyuréthane contenue dans la coupelle en mouvement. Le CIP10 peut-être équipée de différents sélecteurs : têtes inhalables ou thoraciques ou alvéolaires.	<b>1<sup>er</sup> niveau</b> La masse de particules collectée est déterminée par pesée différentielle avant et après le prélèvement. <b>2<sup>ème</sup> niveau</b> Dosage des différentes formes de silices cristallines. D'autres analyses compatibles avec le support d'échantillonnage sont envisageables.	Outils très robuste, mais nécessitant une durée de prélèvement longue (>20 heures) pour obtenir des résultats exploitables. Existe une version environnementale (7 jours de prélèvement en autonomie).	€	+	Pas de mesure en continu <b>1<sup>er</sup> niveau</b> mg/m <sup>3</sup> <b>2<sup>ème</sup> niveau</b> composition chimique (si compatible avec mousse : Plomb, silice)
LIDAR	Envoi d'une impulsion laser (longueur d'onde définie) dans l'atmosphère (longue distance)	Analyse de l'intensité du rayonnement retrodiffusé par les particules.	Outils de recherche Mobile mais non portable	€€€€	+++++	Mesure en continu Evaluation volumique (3D) de la charge en aérosol présent dans l'atmosphère. Porté quelque km Résolution quelque mètres





## **8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

Allen, G., Sioutas, C., Koutrakis, P., Reiss, R., Lurmann, F.W., Roberts, P.T., 1997. Evaluation of the TEOM method for measurement of ambient particulate mass in urban areas. *Journal of the Air and Waste Management Association* 47, 682-689.

Airborne Particles Expert Group (APEG), 1999. Source Apportionment of Airborne Particulate Matter in the United Kingdom, Department of Environment, London, UK.

Chow, J.C., Fujita, E.M., Watson, J.G., Lu, Z., Lawson, D.R., Ashbaugh, L.L., 1994. Evaluation of filter-based aerosol measurements during the 1987 southern california air quality study. *Envir. Mon. and Assess.* 30, 49-80.

Eatough, D.J., Wadworth, A., Eatough, D.A., Crawford, J.W., Hansen, L.D. and Lewis, A.D., 1993, A multi-system, multi-channel diffusion denuder sampler for the determination of fine-particulate organic material in the atmosphere. *Atmospheric Environment* 27, 1213-1219.

EN12341, 1998. Air quality-determination of the PM10 fraction of suspended particulate matter-reference method and field test procedure to demonstrate reference equivalence of measurement methods.

Fabriès, J.F., 1992. Health Related Measurement of Particulate Fractions. Respirable and Thoracic Dust. *Staub-Reinhalt Luft*, 52 : 279-281.

Fontan J., « Dimensions, dimensions moyennes, fonctions de distribution d'un aérosol », *Pollution Atmosphérique n°175*, juillet-septembre 2002.

Green, D., Fuller, G., Barratt, B., 2001. Evaluation of TEOM 'correction factors' for assessing the EU Stage limit values for PM10. *Atmospheric Environment* 35, 2589 – 2593.

Le Bihan, O. Problématique globale des poussières fines – Note de synthèse – Ministère de l'Écologie et du Développement Durable – Septembre 2003.

Madeleine, G., Perrin, M.L., Renoux, A., 1980. Mesure de la composante fine de l'aérosol atmosphérique. Colloque Météorologie et Environnement, MECV, EERM Paris, 13-21.

Muir, D., 2000. The suitability of the tapered element oscillating microbalance (TEOMs) for PM10 monitoring in Europe. The use of PM10 data as measured by TEOM for compliance with the European Air Quality Standard. *Atmospheric Environment* 34, 3209-3212.

Patasnick, H., Rupprecht, E.G., 1991. Continuous PM-10 measurement using the tapered element oscillating microbalance. *Journal of the Air and Waste Management Association* 41, 1079-1083.

Putaud et al., « A European Aerosol Phenomenology : physical and chemical characteristics of particulate matter at kerbsite, urban, rural and background sites in Europe. », EUR 20411 EN, 2002.

Renoux, A. et Boulaud, D., 1998, *Les aérosols : physique et métrologie.*, Edition Tec et Doc, Lavoisier, Paris.

Van Dingenen R. et al, 2004. « A European Aerosol Phenomenology : physical characteristics of particulate matter at kerbsite, urban, rural and background sites in Europe. ». Atmospheric Environment 38 (2004) 2561-2577.

Wang, S.C. and Flagan, R.C., 1990, Scanning electrical mobility spectrometer. Aerosol Sci. Technol., 13, 230-240.

Witz, S., Eden, R.W., Wadley, M.W., Dundwoody, C., Papa, R.P., Torre, K.J., 1990. Rapid loss of particulate nitrate, chloride and ammonium on quartz fiber filters during storage. Journal of the Air and Waste Management Association 40 (1), 53-61.

Willeke, K., and Baron, P.A. (Eds), 1993, Aerosol measurements: Principles, techniques and applications, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, USA.

NF X 43-276- EN 481 - Définition des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air - Novembre 1993.

NF X 43-259 - Air des lieux de travail - Prélèvement individuel ou à poste fixe de la fraction alvéolaire de la pollution particulaire - Méthode de séparation par cyclone 10 mm - Mai 1990.

NF X 43-257 - Air des lieux de travail - Prélèvement individuel de la fraction inspirable de la pollution particulaire - Août 1988.

NF X 43-262 - Air des lieux de travail - Détermination gravimétrique du dépôt alvéolaire de la pollution particulaire - Méthode de la coupelle rotative - Octobre 1990.

NF X 43-017 – Air Ambient - Mesure de la concentration des matières en suspension dans l'air ambiant – Méthode par absorption de rayons  $\beta$  – Juillet 1984.

NF X 43-050 – Air Ambient – Détermination de la concentration en fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission – Méthode indirecte – Janvier 1996.



**INERIS**

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc technologique Alata  
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99