

LE COMPORTEMENT DES AÉROSOLS : DE L'INSTALLATION À L'ENVIRONNEMENT

J.C. LABORDE

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
Service d'Études et de Recherches en Aérodispersion des polluants et en Confinement
B.P. 68 – 91192 GIF-SUR-YVETTE Cedex

RÉSUMÉ

Cette communication a pour objectif de sensibiliser à quelques notions élémentaires de physique des aérosols, ces derniers comptant parmi les principaux vecteurs de la pollution et de la radioactivité atmosphérique. Quels que soient le milieu et sa complexité, les aérosols ont des comportements communs en grande partie liés aux domaines physiques caractéristiques de leurs dimensions.

I. DÉFINITION ET DOMAINE DE DIMENSION /1/

Un aérosol est un ensemble de particules liquides ou solides en suspension dans un milieu gazeux et présentant une vitesse de chute négligeable. Le comportement des particules dépend donc dans une large mesure des mouvements et des propriétés intrinsèques du gaz porteur. Comptant parmi les principaux vecteurs de la pollution et de la radioactivité atmosphérique, les aérosols interviennent dans de nombreux phénomènes naturels (formation de nuages et de précipitations, visibilité, ...) et industriels (filtration, salles à empoussièrément contrôlé, ...).

La gamme de dimension à couvrir est de six ordres de grandeur et s'étend typiquement de 10^{-4} μm à 100 μm . A l'intérieur de cette large gamme, on considère généralement trois domaines :

- ↪ le domaine moléculaire qui correspond à des dimensions de particule de l'ordre du nanomètre à la dizaine de nanomètres et dont le comportement est décrit par la thermodynamique et plus particulièrement la théorie cinétique des gaz ; c'est en particulier le domaine des embryons formés par nucléation de vapeur, de la fraction libre des descendants du radon et des gaz de fission,
- ↪ le domaine continu qui correspond à des dimensions de particule supérieures au micromètre et dont le comportement est décrit par l'aérodynamique ; c'est par exemple le domaine des particules produites par interactions mécaniques (érosion, ablation) et des poudres,
- ↪ le domaine intermédiaire qui correspond à des dimensions comprises entre la dizaine de nanomètres et le micromètre, dont le comportement est décrit par extrapolation du domaine moléculaire ou du domaine continu ; c'est le lieu de l'accumulation de matière condensée.

La gamme de concentration couverte en physique et en métrologie des aérosols est extrêmement vaste, 15 ordres de grandeur, et s'étend typiquement de 10^{-15} kg/m^3 à 1 kg/m^3 . A titre d'exemple, on peut citer les quatre domaines suivants : le transport de poudres et les incendies (concentrations entre 10^{-3} et 1 kg/m^3), les rejets de cheminée (entre 10^{-6} et 10^{-3} kg/m^3), les aérosols atmosphériques (entre 10^{-10} et 10^{-5} kg/m^3), les milieux ultrapropres (entre 10^{-15} et 10^{-9} kg/m^3).

La combinaison "dimension/concentration d'aérosols" illustre sur la figure 1 le domaine à deux dimensions dans lequel on doit se situer pour étudier la physique et la métrologie des aérosols. Elle montre également les difficultés à surmonter pour décrire le comportement des aérosols et les mesurer, sachant qu'aucun modèle et aucun appareil de mesure uniques ne sont capables de couvrir ces deux dynamiques.

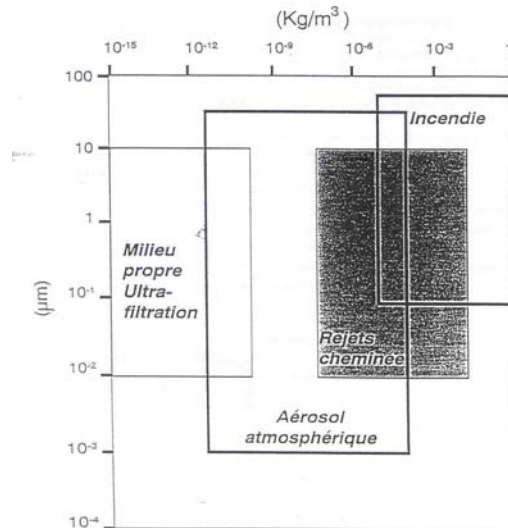


Figure 1 - Domaines de dimension et de concentration

II. CARACTÉRISATION GRANULOMÉTRIQUE /1/

Distribution granulométrique

Les aérosols sont rarement de taille unique. De façon générale, les aérosols naturels et artificiels sont un ensemble de particules solides ou liquides polydispersées, c'est-à-dire dont les tailles varient continûment entre deux limites dimensionnelles. La granulométrie s'intéresse d'abord à la probabilité qu'une particule, prise au hasard dans la population, d'avoir un diamètre choisi à l'avance ; la variation de cette probabilité avec le diamètre entraîne la notion de distribution granulométrique. Celle-ci peut se présenter sous différentes formes mathématiques : histogramme différentiel, lequel tend vers le spectre de fréquences lorsque l'on rend les intervalles de diamètre infiniment petits, et diagramme cumulé.

Le spectre de fréquence des aérosols concorde rarement avec la fonction gaussienne, dite normale, qui est symétrique par rapport au diamètre le plus probable. Il se rapproche bien souvent de la loi logarithmico-normale. En abscisse figure alors le logarithme du diamètre des particules, et en ordonnée la loi de probabilité normale.

L'expression mathématique traduisant la loi log-normale s'écrit :

$$f(d_p) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \ln \sigma_g} \exp \left[-\frac{(\ln d_p - \ln \bar{d}_p)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right]$$

où \bar{d}_p est le diamètre moyen des particules et σ_g l'écart-type géométrique.

Le diagramme cumulé est une représentation très commode puisque les méthodes expérimentales de mesure donnent souvent, par rapport à la population totale, la proportion en nombre, en surface ou en masse des particules de taille supérieure, ou inférieure, à un diamètre. L'ordonnée est donc proportionnelle à la fréquence cumulée, pour un diamètre donné, et exprimée en pourcentage de la population totale. Pour un aérosol distribué suivant une loi log-normale, le diagramme cumulé est une droite. Le diamètre médian correspond à une fréquence cumulée de 50 %, et la dispersion de l'aérosol est caractérisée par l'écart-type géométrique σ_g ; il se détermine graphiquement :

$$\sigma_g = \frac{\text{diamètre à 84,1\%}}{\text{diamètre à 50\%}}$$

Plus ce nombre sans dimension est voisin de 1, moins l'aérosol est dispersé.

Caractérisation granulométrique liée au comportement

Le comportement des aérosols dans les installations ou dans l'environnement est rarement décrit à partir de la connaissance d'une grandeur géométrique issue de l'observation microscopique de la particule qui peut être de forme complexe. Les trois principaux diamètres caractéristiques les plus souvent utilisés sont :

- ↪ le diamètre équivalent en volume (d_e) qui correspond au diamètre de la sphère possédant la même masse m et la même masse volumique ρ_p que la particule considérée de forme quelconque,
- ↪ le diamètre de Stokes qui correspond au diamètre d'une sphère ayant la même vitesse limite de chute (ou vitesse de sédimentation) et la même masse volumique que la particule considérée,
- ↪ le diamètre aérodynamique (d_a) qui correspond au diamètre d'une sphère ayant la même vitesse limite de chute que la particule et une masse volumique de $1\ 000\ \text{kg.m}^{-3}$.

Le diamètre aérodynamique est le paramètre essentiel intervenant dans les processus de dépôt de particules, de filtration, ... ; il décrit le comportement aéraulique d'un aérosol. Dans de nombreux cas, il n'est pas nécessaire de connaître la dimension vraie, la forme et la densité de la particule si des moyens métrologiques ont permis d'accéder directement à son diamètre aérodynamique. Il est donné par la relation suivante :

$$d_a = d_e \cdot \left(\frac{\rho_p}{1000 \cdot \chi} \right)^{1/2}$$

ρ_p représente la masse volumique de la particule considérée (kg.m^{-3}) et χ le facteur de forme dynamique.

III. MÉCANISMES ÉLÉMENTAIRES LIÉS AU COMPORTEMENT DES AÉROSOLS /1/

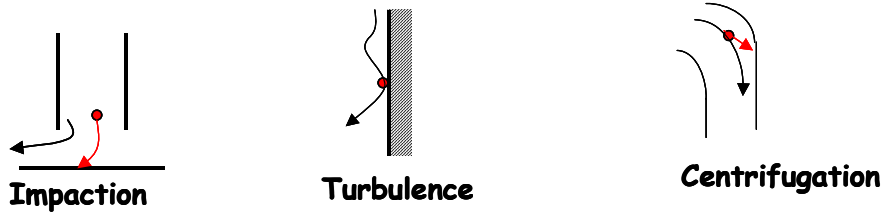
La valeur du nombre de Knudsen Kn , rapport entre le libre parcours moyen des molécules d'air et le rayon d'une particule, permet de distinguer deux types fondamentaux de comportement des aérosols correspondant aux domaines continu ($Kn \ll 1$) et moléculaire ($Kn \gg 1$).

Selon leur diamètre, les particules vont être soumises à trois familles de phénomènes principaux auxquels se rattachent des mécanismes élémentaires de transfert et de dépôt des aérosols, illustrés qualitativement ci-dessous :

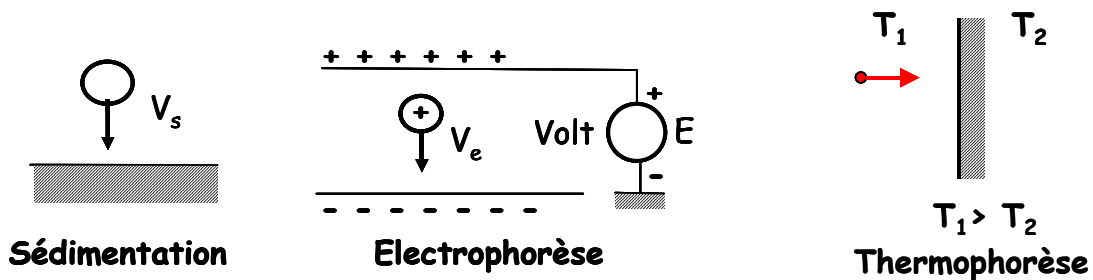
↪ la diffusion brownienne,



↪ l'inertie de la particule par rapport au fluide vecteur, auxquels sont par exemple associés des dépôts sur un obstacle par impaction, diffusion turbulente, centrifugation,



↪ l'action d'un champ de forces extérieures auxquels sont associés les dépôts par sédimentation, électrophorèse, thermophorèse.



Seuls sont quelque peu explicités ici les comportements liés aux phénomènes de diffusion moléculaire et de sédimentation, afin de bien comprendre par la suite des comportements génériques.

Action du champ de pesanteur : sédimentation

♦ Si $Kn \ll 1$, le rayon r des particules est grand devant le libre parcours moyen des molécules d'air ($0,064 \mu m$ à température et pression normales) ; le fluide peut donc être considéré comme continu ; dans un gaz au repos la chute est laminaire. Le milieu (l'air dans notre cas) exerce une force qui s'oppose au déplacement de vitesse v des particules, appelée force de traînée, qui est évaluée par l'équation de Stokes :

$$F = 6 \pi . r . \mu . v$$

où μ est la viscosité dynamique du milieu. Cette équation est valable pour $0,8 < r < 35 \mu m$.

La force de pesanteur s'exerçant sur la particule, considérée comme sphérique, est :

$$P = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g$$

où g est l'accélération de la pesanteur.

La vitesse limite de chute $v = V_s$, ou vitesse de sédimentation d'une particule de diamètre d_p , est atteinte lorsque la force de résistance aérodynamique (F) équilibre son poids (P) ; on obtient alors :

$$V_s = \tau \cdot g, \text{ où } \tau = \frac{d_p^2 \cdot (\rho_p - \rho_g)}{18 \mu}$$

La masse volumique du gaz ρ_g est généralement négligeable devant celle de la particule ρ_p .

On appelle τ le temps de relaxation d'une particule donnée dans un milieu donné. Il correspond au temps mis par une particule de vitesse initiale nulle pour atteindre une vitesse égale à $0,63 V_s$ lorsqu'elle tombe dans un gaz au repos. La distance d'arrêt d'une particule, d_a , est liée à τ par la relation : $d_a = v \cdot \tau$. Elle permet de calculer la distance que la particule parcourt dans un gaz au repos, lancée à une vitesse v dans une certaine direction, sous l'influence de la force de traînée et en l'absence de toute force extérieure.

♦ Si $Kn \sim 1$, soit $r \sim 6,4 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$, les dimensions des vides intermoléculaires et des particules étant comparables, le milieu ne peut plus être considéré comme continu. Pour ce domaine intermédiaire, la formule de Stokes doit être corrigée par le coefficient C de Cunningham :

$$F = \frac{6\pi \cdot r \cdot \mu \cdot v}{C}$$

Le tableau 1 donne quelques exemples de vitesse de sédimentation pour différents diamètres aérodynamiques de particules.

Tableau 1 - Vitesse de sédimentation pour différents diamètres aérodynamiques de particules, à 20°C et 1 atmosphère

d_a (μm)	V_s ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
0,01	$7 \cdot 10^{-8}$
0,1	$8,8 \cdot 10^{-7}$
1	$3,5 \cdot 10^{-5}$
10	$3,1 \cdot 10^{-3}$
100	0,25

Action du mouvement brownien : diffusion

Si $Kn \gg 1$, soit $r \ll 6,4 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$, les fines particules subissent des déplacements erratiques qui sont une résultante de l'agitation intense des molécules ; leur comportement est caractérisé par la théorie cinétique des gaz.

Le phénomène fondamental concernant les fines particules est leur diffusion moléculaire sous l'action du mouvement brownien. Selon l'équation d'Einstein, le coefficient de diffusion moléculaire d'une particule est donné par la relation :

$$D_i = k.T.B$$

où T est la température absolue, k la constante de Boltzmann ($1,38.10^{-23}$ J.deg⁻¹) et B la mobilité dynamique de la particule qui est, pour un milieu visqueux considéré, le rapport constant de la vitesse à la force de traînée appliquée à la particule.

$$\text{Soit } D_i = \frac{k.T.C}{3.\pi.\mu.d_p}$$

Le déplacement quadratique moyen d'un aérosol (\bar{z}^2) dans une direction, par diffusion moléculaire, est donné par la relation $\bar{z}^2 = 2.D_i . t$, expression dans laquelle t est le temps (s). Le tableau 2 synthétise quelques données caractéristiques liées au phénomène de diffusion moléculaire.

Tableau 2 - Coefficient de diffusion moléculaire et déplacement par unité de temps pour différents diamètres de particules à 20°C et 1 atmosphère

d_p (μm)	D_i ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	\bar{z} pour 1 s (m)
0,001	$5,14.10^{-6}$	$3,2.10^{-3}$
0,01	$5,24.10^{-8}$	$3,23.10^{-4}$
0,1	$6,75.10^{-10}$	$3,67.10^{-5}$
1	$2,77.10^{-11}$	$7,44.10^{-5}$
10	$2,38.10^{-12}$	$2,18.10^{-6}$

La diffusion brownienne n'explique pas les transports d'aérosols observés à grande échelle pour lesquels le phénomène prépondérant est la diffusion turbulente de l'écoulement du fluide porteur. Néanmoins, la diffusion brownienne est prépondérante dans le cas d'écoulements laminaires (le long d'une paroi ou d'un obstacle par exemple).

Comportement caractéristique du domaine moléculaire au domaine continu

Afin d'illustrer le comportement caractéristique des aérosols allant du domaine moléculaire au domaine continu, intéressons-nous au déplacement par unité de temps d'aérosols soumis aux deux phénomènes décrits précédemment : la diffusion moléculaire et la sédimentation. La figure 1 illustre ce déplacement par unité de temps en fonction du diamètre des aérosols.

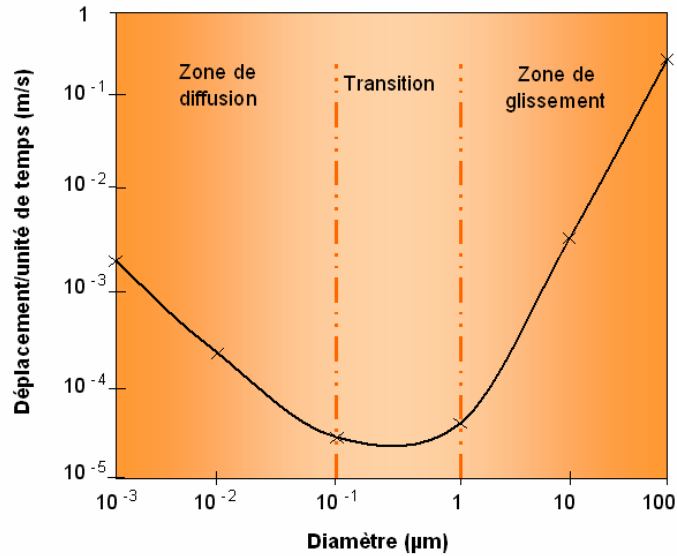


Figure 1 - La courbe en "V"

On observe que le déplacement par unité de temps augmente lorsque le diamètre des particules diminue pour des particules inférieures à $0,1$ µm (zone de diffusion moléculaire) et qu'il augmente lorsque le diamètre des particules augmente pour des particules supérieures à 1 µm (zone de glissement) ; pour des particules comprises entre $0,1$ µm et 1 µm, le déplacement par unité de temps est minimal (zone de transition).

L'allure de la courbe dite "courbe en V" est caractéristique du comportement des aérosols quel que soit le milieu dans lequel ils évoluent et vont être amenés à se déposer (arbre respiratoire, conduit de prélèvement, filtre, végétaux, ...).

IV. APPLICATION DU COMPORTEMENT GÉNÉRIQUE DES AÉROSOLS

De manière générale, le comportement des aérosols va résulter de l'interaction entre les grandeurs caractéristiques de l'aérosol (diamètre aérodynamique, mobilité électrique,...), des conditions thermodynamiques du fluide porteur (température, pression, hygrométrie, ...) et de l'obstacle dans lequel va être amené à se déposer l'aérosol.

L'aérosol comme le milieu et l'obstacle lui-même peut être amené à évoluer au cours du processus. Concernant l'aérosol, cette évolution relève des phénomènes propres à la dynamique des aérosols (nucléation, évaporation, condensation, coagulation) qui ne peuvent être explicités dans le cadre de cette communication. Le milieu et l'obstacle peuvent être amenés à évoluer eux-même (colmatage d'un filtre par les aérosols, apparition de précipitations dans l'environnement, par exemple), rendant complexe dans bien des cas l'interaction aérosol/milieu/obstacle.

Nous allons néanmoins illustrer quelques exemples du comportement générique des aérosols ("courbe en V") dans un milieu et des conditions thermodynamiques données.

Cas du dépôt d'aérosols dans les conduits de prélèvement /2/ /3/

Les principaux mécanismes de dépôts d'aérosols dans les conduits de prélèvement véhiculant l'air échantillonné vers un dispositif de mesure de la contamination atmosphérique sont illustrés figure 2 ; il s'agit principalement du dépôt par diffusion brownienne ①, par sédimentation ②, par impaction sous l'effet de la force centrifuge ③ (cas des coudes), par thermophorèse ④ (lorsqu'il existe de forts gradients de température entre le fluide et la paroi), par effet électrostatique ⑤ et par diffusion turbulente ⑥. Selon les cas, certains phénomènes peuvent être prépondérants devant les autres. A titre d'exemple, la figure 2 représente la fraction d'aérosols déposés en fonction du diamètre aérodynamique d'aérosols dans le cas d'un conduit circulaire de 10 m de long et 10 cm de diamètre, les résultats étant paramétrés en fonction du débit de prélèvement ; une forme de courbe en "V" est bien retrouvée.

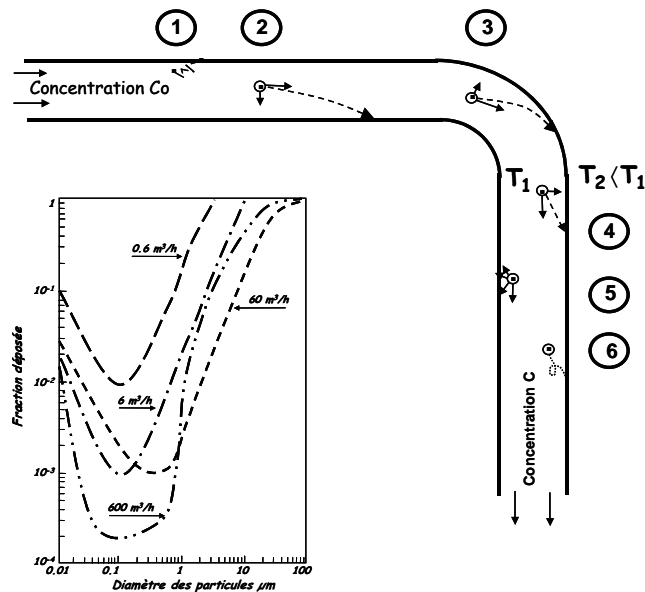


Figure 2 - Dépôts des aérosols dans des conduits de prélèvement

Cas de la filtration

Qu'il s'agisse d'un filtre industriel placé dans un réseau de ventilation d'une installation ou d'un filtre de prélèvement utilisé pour des mesures de l'activité volumique dans une installation ou dans l'environnement, les mécanismes de collecte des aérosols sont les mêmes ; ils sont illustrés figure 3. Il s'agit principalement de la diffusion moléculaire, de l'interception et de l'inertie autour d'une fibre, élément collecteur du filtre /4/.

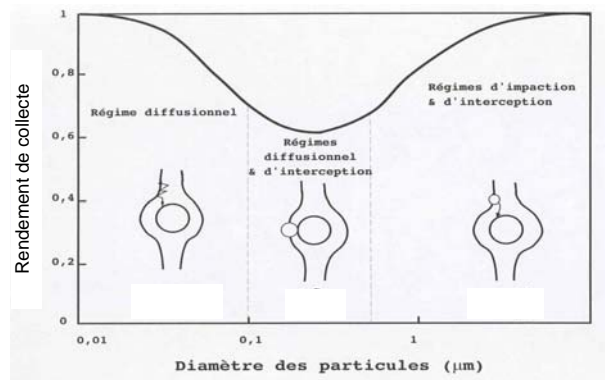


Figure 3 : mécanismes de filtration des aérosols

La figure 4 présente des résultats expérimentaux en termes de coefficient d'épuration d'un filtre THE (Très Haute Efficacité) en fonction du diamètre des particules, pour différentes vitesses de filtration /5/. Le coefficient d'épuration représente le rapport des concentrations d'aérosols en amont et en aval du filtre.

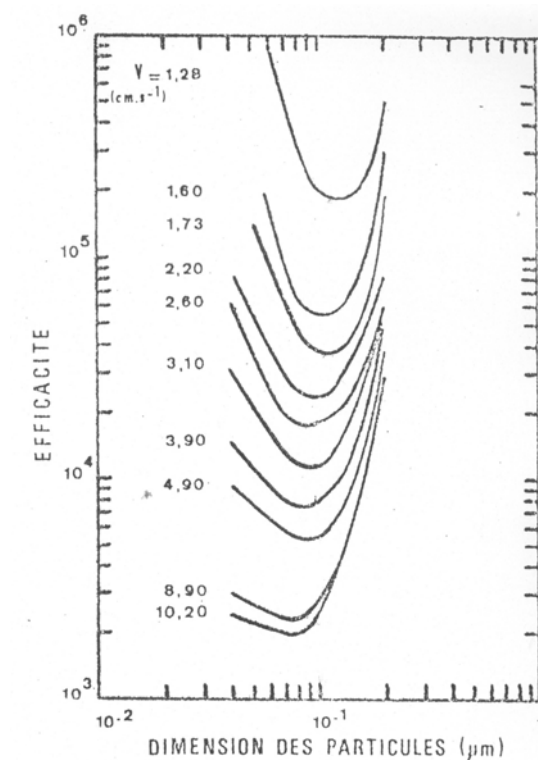


Figure 4 - Influence du diamètre des aérosols sur l'efficacité d'un filtre

On observe une courbe caractéristique en V, témoignant du fait que le coefficient d'épuration d'un filtre passe par un minimum en fonction du diamètre des particules ; de même, pour le diamètre des particules les plus pénétrantes (0,1 µm à 0,3 µm), le coefficient d'épuration passe par un minimum en fonction de la vitesse de filtration (pour $V \approx 30 \text{ cm.s}^{-1}$).

Cas du dépôt d'aérosols dans les voies respiratoires

Le dépôt des aérosols dans les voies respiratoires est illustré au travers des travaux de Morawska et al. /6/ qui se sont intéressés récemment au cas des aérosols de combustion de différentes origines : fumée de tabac (ETS sur la figure 5), diesel, essence. Ces travaux concernent donc des aérosols submicroniques qui pénètrent au plus profond des voies respiratoires, le cas des aérosols microniques ayant été plus souvent étudié.

La figure 5 illustre les résultats expérimentaux obtenus et les compare à des résultats issus de modèles numériques de dépôt à deux fréquences respiratoires. L'allure en V est là encore retrouvée.

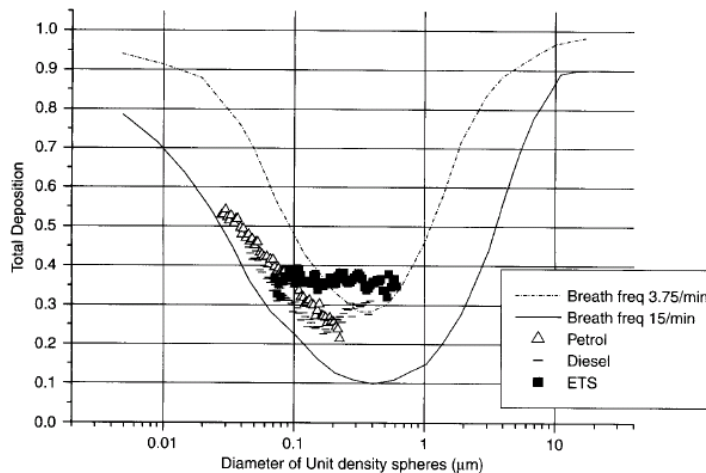


Figure 5 - Exemple de fraction totale d'aérosols déposés dans les voies respiratoires

Cas du transport des aérosols dans l'environnement

Comme précédemment, il s'agit là encore d'illustrer le comportement générique dans un milieu "instable" rendant les phénomènes à étudier d'autant plus complexes. Outre la dispersion atmosphérique proprement dite, un panache d'effluents renfermant des aérosols peut être soumis à des processus tels que le dépôt humide, le dépôt sec et des transformations physico-chimiques.

Ainsi, en présence de précipitations, les particules peuvent être incorporées dans les gouttes d'eau nuageuse et précipiter (phénomène appelé "rainout") ; elles peuvent par ailleurs être rabattues par les gouttes de pluie ("washout"). L'appellation de dépôt humide est employée pour décrire cette première voie de dépôt vers des obstacles (couverts végétaux, par exemple). En l'absence de précipitations, les particules peuvent être amenées par l'écoulement atmosphérique à proximité de la surface terrestre et s'y déposer sous l'action conjuguée des mêmes mécanismes physiques qu'évoqués précédemment (diffusion brownienne, sédimentation, impaction, ...); le terme de dépôt sec est employé. Les transformations physico-chimiques incluent les phénomènes tels que la décroissance radioactive, l'évaporation/condensation, la coagulation d'aérosols.

Bien que les phénomènes soient complexes, on retrouve des comportements invariants quels que soient les milieux. Ainsi, Petroff /7/ a tout récemment étudié la phénoménologie du dépôt sec d'aérosols sur un couvert végétal, l'évaluation réaliste des flux de dépôts en conditions sèches restant incertaine, notamment dans le cas des aérosols fins et des couverts végétaux fortement rugueux. La figure 6 illustre la courbe caractéristique en V obtenue dans le cas de dépôts sur de l'herbe naturelle.

De ce comportement caractéristique, il convient également de retenir que, dans la basse atmosphère de l'environnement, ce sont les particules de diamètres compris entre 0,1 µm et 1 µm qui ont le temps de séjour le plus long et sont donc transportés à plus longue distance /1/.

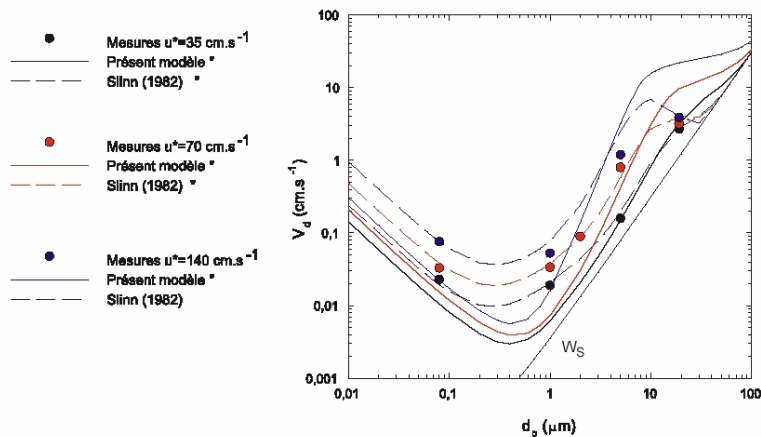


Figure 6 : Exemple de vitesses de dépôt d'aérosols sur de l'herbe naturelle

CONCLUSION

Des installations à l'environnement, le comportement des aérosols résulte de l'interaction entre les propriétés de ces derniers, du fluide qui les transporte et du milieu dans lequel ils évoluent. Malgré la diversité de ces trois composantes, il existe un comportement commun des aérosols (courbe en "V") lié aux domaines physiques (moléculaire, continu, intermédiaire) caractéristiques de leurs dimensions.

Les connaissances en physique des aérosols appliquées à un système élémentaire, au repos et invariant semblent de nos jours suffisamment avancées. Les travaux conséquents restant à mener par la communauté scientifique consistent à les adapter, via des travaux expérimentaux et numériques, à des systèmes plus réalistes et plus complexes rencontrés aussi bien dans les installations que dans l'environnement .

RÉFÉRENCES

- /1/ D. BOULAUD, A. RENOUX. Les aérosols : Physique et Métrologie. Technique et documentation - Éditions Lavoisier, 1998
- /2/ J. CHARUAU. Étude du dépôt des particules dans les conduits : optimisation des tubes de prélèvement des aérosols radioactifs – Rapport CEA-R-5158, 1982
- /3/ V. SALDO. Étude du dépôt d'aérosols dans des conduits en écoulement turbulent. Thèse Université de Provence, 1986
- /4/ J.C. GUICHARD. Les mécanismes de la filtration de l'air. Guide de la filtration de l'air - Édition IDEXPO, 1988
- /5/ A. BRIAND, J. DUPOUX. Influence de la dimension des particules et de la vitesse de filtration sur l'efficacité des filtres à air. 11^{ème} colloque IRCHA sur les atmosphères Polluées, Paris, 1974
- /6/ L. MORAWSKA. Experimental study of the deposition of combustion aerosols in the human respiratory tract. Journal of Aerosol Science, 36, p. 939-957, 2005
- /7/ A. PETROFF. Étude mécanique du dépôt sec d'aérosols sur couverts végétaux. Thèse Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, 2005