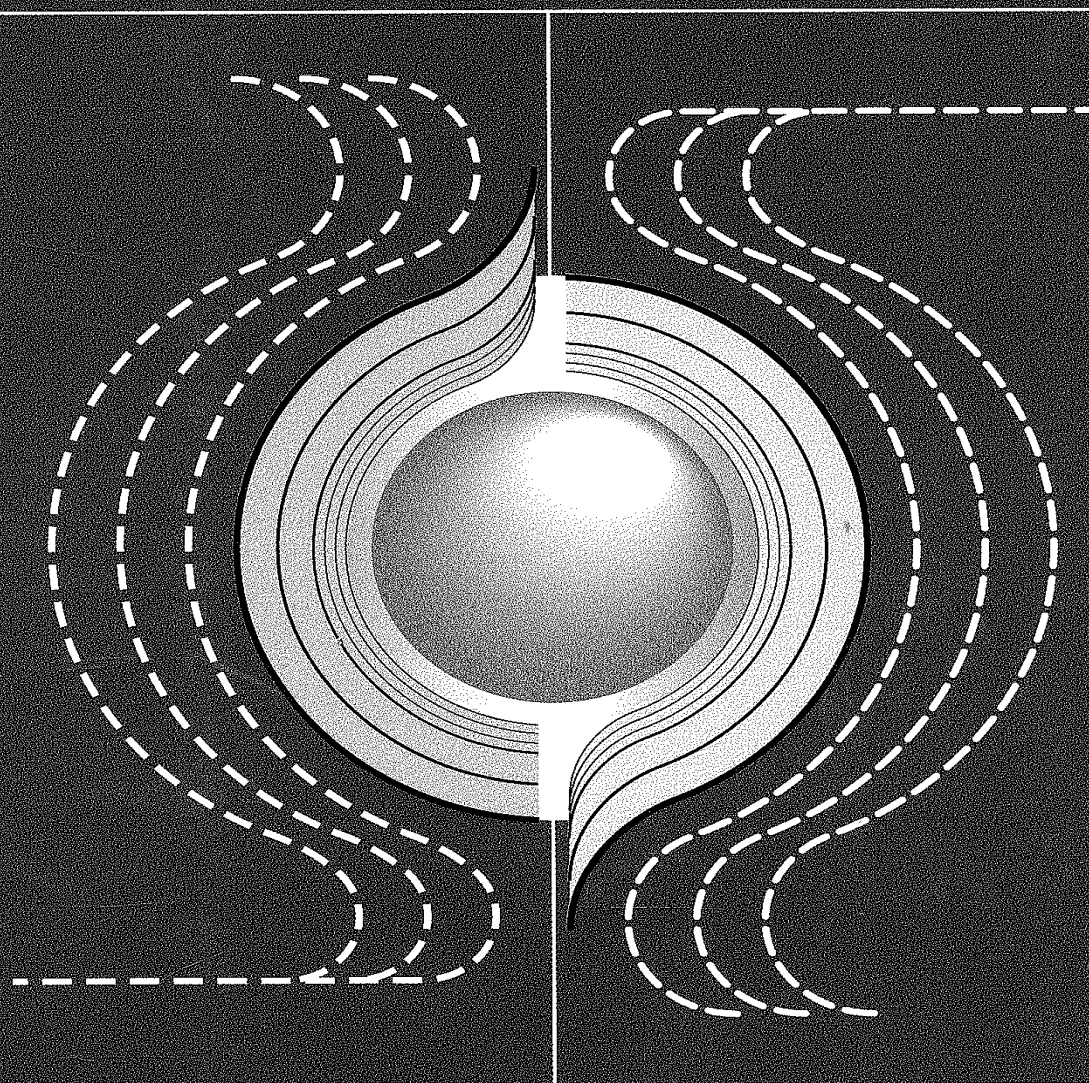


André Renoux

Denis Boulaud

Les aérosols



Physique et Métrologie

lavoisier
TEC
m/doc

2-628-221-1



2-628-221-1

LES AÉROSOLS

Physique et métrologie

ANDRÉ RENOUX

*Professeur à l'université Paris XII
Directeur du LPATC,
Laboratoire de physique des aérosols
et de transfert des contaminations
Fondateur et directeur du DESS
Science des aérosols,
Génie de l'aérocontamination
Président de l'ASFERA, Association française
d'études et de recherches sur les aérosols
Président de l'OPQUP, Office professionnel
de qualification des entreprises
de l'ultrapropreté*

DENIS BOULAUD

*Directeur de recherches
au Commissariat à l'énergie atomique
Professeur à l'Institut national des sciences
et des techniques nucléaires
Chef du Laboratoire de physique
et de métrologie des aérosols
de l'Institut de protection
et de sûreté nucléaire
Vice-président de l'Association
française d'études
et recherches sur les aérosols*

LONDRES



NEW YORK

PARIS

11, rue Lavoisier
F 75384 Paris Cedex 08

Table des matières

PARTIE I – Propriétés physiques

André RENOUX

CHAPITRE 1 : Quelques notions sur l'aérosol atmosphérique.....	3
1. Origines et caractéristiques physiques principales de l'aérosol atmosphérique.....	3
1.1. Origine naturelle	3
1.2. Origines anthropogènes	3
1.3. Formation des grosses particules ($d_p > 2 \mu\text{m}$)	6
1.4. Les fines particules ($d_p < 2 \mu\text{m}$)	6
2. Un cas particulier : l'aérosol radioactif naturel.....	10
2.1. Origine de la radioactivité naturelle	10
2.2. Concentration de l'air en radon et en thoron	14
2.3. L'aérosol radioactif naturel.....	14
2.3.1. État d'équilibre radioactif entre le radon et ses descendants à vie courte	14
2.3.2. État de charge électrique de l'aérosol radioactif naturel.....	15
2.3.3. Granulométrie de l'aérosol radioactif naturel	16
CHAPITRE 2 : Les lois de distribution granulométrique des aérosols	19
1. Les dimensions statiques des aérosols	19
1.1. Le diamètre de Martin.....	19
1.2. Le diamètre de Feret	19
1.3. Le diamètre de Stokes	19
1.4. Le diamètre aérodynamique	20
1.5. Le diamètre du volume équivalent	20
1.6. Le diamètre projeté	20

2. Les facteurs de forme	20
2.1. Facteurs de forme géométrique	21
2.2. Le facteur de forme dynamique.....	21
2.3. Le coefficient de sphéricité.....	22
3. Les lois mathématiques de distribution granulométrique des aérosols...	22
3.1. Établissement d'une granulométrie	22
3.2. Distribution cumulée	23
3.3. Courbes de distribution différentielles (ou relatives).....	25
3.4. Les paramètres caractéristiques des distributions granulométriques	27
3.5. La loi de distribution normale ou gaussienne	27
3.6. La loi logathimiconormale ou loi log normale	29
3.7. La loi de distribution de Rosin-Rammler (1927)	33
3.8. La loi puissance.....	35
3.9. Les moments d'une distribution granulométrique	36
 CHAPITRE 3 : Les propriétés physiques des aérosols	 37
1. Quelques rappels de théorie cinétique des gaz	37
1.1. Milieu ne comportant qu'une seule sorte de molécules	37
1.1.1. Distribution des vitesses. Loi de Maxwell-Boltzmann.....	37
1.1.2. Flux de particules	39
1.1.3. Libre parcours moyen	39
1.2. Milieu constitué par deux sortes de molécules (ou particules).....	40
1.2.1. Libre parcours moyen	41
1.2.2. Coefficient de diffusion des aérosols	41
1.2.2.1. Diffusion mutuelle.....	41
1.2.2.2. Mobilité dynamique	43
1.2.2.3. Temps de relaxation (Fuchs, 1964)	43
1.3. Équation de la diffusion. Les lois de Fick	47
2. La sédimentation des aérosols (mouvement des particules sous l'action de la pesanteur)	48
2.1. Fluide continu. Régime linéaire. $Kn \ll 1$. Loi de Stockes	49
2.2. Écarts avec la loi de Stockes. Cas de nombres de Reynolds élevés...	49
2.3. Domaine intermédiaire $Kn \approx 1$. Formule de Millikan	56
2.4. Domaine moléculaire ($Kn \gg 1$)	58
2.5. Quelle relation choisir ?.....	58
2.5.1. Le nombre de Peclet.....	59
2.5.2. Le nombre de Stockes	59
3. Les phénomènes de thermophorèse, photophorèse, diffusionphorèse	60
3.1. La thermophorèse.....	60
3.1.1. $r_p \gg \lambda_g$ ($Kn \ll 1$).....	60
3.1.2. Cas où $r_p < \lambda_g$ ($Kn > 1$).....	61
3.2. La photophorèse.....	62
3.3. La diffusionphorèse.....	63
4. Coagulation des aérosols.....	64
4.1. Coagulation thermique ou par diffusion brownienne	64
4.1.1. Cas d'un aérosol monodispersé.....	64

4.1.1.1. Expression du coefficient de Stokes ($Kn < 1$). Cas d'un aérosol monodispersé	64
4.1.1.2. Cas où $Kn \approx 1$	65
4.1.1.3. Cas où $Kn > 1$. Méthode de la sphère limite	65
4.1.2. Cas d'un aérosol bidispersé	67
4.1.2.1. Dans le domaine de Stokes (r_1 et $r_2 \gg \lambda_g$)	67
4.1.2.2. Domaine intermédiaire ($\lambda_g \approx r$)	68
4.1.2.3. Domaine moléculaire ($r < 10^{-2} \mu\text{m}$)	68
4.2. Influence de la coagulation sur la granulométrie d'un aérosol	69
4.2.1. Aérosol initialement monodispersé	69
4.2.2. Aérosol polydispersé : équation de la coagulation	71
4.3. Efficacité de collision	71
4.4. Théorie de l'autopréservation (self preserving)	72
4.5. Cas où des forces autres que celles dues à l'agitation thermique ou à la gravitation agissent sur les particules	73
4.5.1. Les forces intermoléculaires	74
4.5.2. Les forces électriques	74
4.5.3. La coagulation sonore	74
5. Adhérence et réentraînement des aérosols	76
5.1. Les forces de Van der Waals	76
5.2. Les forces électriques	76
5.3. Les forces de capillarité	78
5.4. Entraînement des poussières fixées sur une surface	79
6. Les propriétés électriques des aérosols	81
6.1. La mobilité électrique	81
6.2. La classification des ions. Les ions atmosphériques	83
6.2.1. Deux grandes catégories	83
6.2.2. L'intensité d'ionisation	84
6.2.3. Nature des petits ions	84
6.3. Expression de la mobilité électrique d'un ion	85
6.3.1. Quelques remarques	85
6.3.2. Théorie de Langevin	87
6.3.3. Libre parcours moyen d'un petit ion	88
6.4. Recombinaison des petits ions	89
6.5. Les particules chargées	89
6.5.1. Coefficient de diffusion et mobilité des gros ions	89
6.5.2. Charge électrique produite par la mise en suspension des particules	89
6.5.2.1. Particules solides	89
6.5.2.2. Particules liquides	90
6.5.2.3. Charge limite	90
6.5.3. Électrisation d'un aérosol en milieu ionisé unipolaire	91
6.5.3.1. Charge par diffusion ionique	91
6.5.3.2. Cas où la particule est soumise à un champ électrique	91
6.5.4. Électrisation d'un aérosol en milieu ionisé bipolaire	93
6.5.4.1. Équations générales	93
6.5.4.2. État de charge à l'équilibre ionique	95

7. Condensation évaporation des aérosols liquides	98
7.1. Quelques définitions	99
7.2. L'effet Kelvin	99
7.2.1 Formule de Laplace	99
7.2.2. Formule de Kelvin	100
7.3. Présence de particules étrangères.....	102
7.4. Grossissement des gouttes	104
7.4.1. Si $d_p < \lambda_g$ ($Kn > 1$).....	104
7.4.2. Si $d_p > \lambda_g$, $Kn < 1$ (régime continu)	105
7.4.3. $d_p > 1 \mu\text{m}$	106
8. Les propriétés optiques des aérosols.....	106
8.1. Quelques définitions.....	107
8.2. Absorption de la lumière par les aérosols	108
8.3. La diffusion de la lumière par les aérosols.....	109
8.3.1. La diffusion de Rayleigh.....	109
8.3.2. La théorie de Rayleigh-Gans.....	110
8.3.3. La théorie de Mie ou de Lorenz-Mie.....	110
8.3.4. La théorie de Lorenz-Mie généralisée	111
Références bibliographiques.....	113

PARTIE II – La mesure

Denis BOULAUD

CHAPITRE 4 : Les principes de la mesure.....	123
1. Les méthodes de mesure	123
1.1. Introduction.....	123
1.2. Les différents aspects de la mesure.....	124
1.2.1. Propriétés et paramètres caractéristiques	124
1.2.2. Conditions de mesure	124
1.2.3. Prélèvement avec collection et analyse ou mesure en temps réel	126
1.2.4. Prélèvement actif ou passif.....	126
1.3. Méthodes par collection	126
1.3.1. Collection sur filtre	127
1.3.2. Collection inertielle et par champ de force	127
1.4. Méthodes d'analyse.....	128
1.4.1. Caractérisation physique	128
1.4.2. Caractérisation chimique	129
1.4.3. Caractérisation biologique	129
1.4.4. Méthodes de mesure en "temps réel"	129
2. Prélèvement et transport	130
2.1. Introduction.....	130
2.2. Efficacité d'échantillonnage.....	132

2.2.1. Efficacité de captage	132
2.2.2. Efficacité de transmission.....	141
2.2.3. Efficacité d'échantillonnage	144
2.3. Le transport des échantillons	146
2.3.1. Dépôt par sédimentation	146
2.3.2. Dépôt par diffusion brownienne	147
2.3.3. Dépôt inertiel turbulent	148
2.3.4. Dépôt inertiel dans les coudes	149
2.3.5. Dépôt inertiel dans les singularités.....	149
2.3.6. Dépôt électrostatique	149
2.3.7. Dépôts par thermophorèse et diffusiophorèse.....	149
Références bibliographiques.....	150
3. Analyses des données.....	152
3.1. Introduction.....	152
3.2. Le problème à résoudre.....	152
3.2.1. Généralités.....	152
3.2.2. L'équation intégrale	153
3.3. Les méthodes d'inversion	154
3.3.1. Méthodes linéaires.....	154
3.3.2. Méthodes non linéaires	156
Références bibliographiques.....	157
 CHAPITRE 5 : Les techniques instrumentales	 159
1. Méthode de collection par filtration	159
1.1. Introduction.....	159
1.2. Principes généraux de l'échantillonnage par filtration	159
1.3. Les filtres pour la mesure des aérosols	161
1.3.1. Filtres à fibres.....	161
1.3.2. Membranes poreuses.....	161
1.3.3. Membranes à pores capillaires	162
1.3.4. Lits granulaires.....	162
1.4. Théorie de la filtration	162
1.4.1. Filtration stationnaire	162
1.4.2. Filtration non stationnaire.....	167
1.4.3. Cas des membranes.....	168
1.4.4. Perte de charge des filtres.....	168
1.5. Méthodes de test des filtres	168
1.6. Choix d'un filtre.....	171
1.6.1. Analyse gravimétrique	171
1.6.2. Analyse microscopique.....	171
1.6.3. Analyse microchimique.....	171
Références bibliographiques.....	172
2. Les méthodes optiques.....	173
2.1. Introduction.....	173
2.2. Méthodes dans l'axe.....	175

2.2.1. Microphotographie et ombroscopie	175
2.2.2. Holographie	175
2.2.3. Méthode par extinction	179
2.2.4. La diffractométrie	181
2.3. Méthodes hors axe	183
2.3.1. Mesure de l'intensité diffusée – Compteur optique de particules	183
2.3.2. Indicatrice de diffusion	189
2.3.3. Vélocimétrie et anémométrie Doppler	189
2.3.4. Corrélation de photons	190
Références bibliographiques	190
3. Méthodes aérodynamiques (inertie, sédimentation, centrifugation)	192
3.1. Introduction	192
3.2. Classification des méthodes aérodynamiques	193
3.2.1. Équation du mouvement	193
3.2.2. Facteur de forme dynamique	194
3.2.3. Diamètre de Stokes – Diamètre aérodynamique	194
3.3. Méthodes avec forces extérieures	195
3.3.1. Force du champ de pesanteur (sédimentation)	195
3.3.2. Force centrifuge	197
3.4. Méthodes avec variations du vecteur vitesse du fluide	198
3.4.1. Variation en direction	198
3.4.2. Variation en amplitude	204
Références bibliographiques	206
4. Méthodes électriques	208
4.1. Introduction	208
4.2. Marquage des particules	209
4.3. Séparation et sélection des particules	210
4.3.1. Parcours d'une particule chargée dans un champ électrique	210
4.3.2. Fonction réponse d'un analyseur de mobilité électrique	211
4.3.3. Les différents types d'analyseurs de mobilité	212
4.4. Détection	222
4.5. Traitement des données	223
Références bibliographiques	224
5. Compteurs de noyaux de condensation et méthodes diffusionnelles	225
5.1. Introduction	225
5.2. Compteurs de noyaux de condensation (CNC)	225
5.2.1. Principes généraux	225
5.2.2. Les différents types de CNC	227
5.3. Méthodes diffusionnelles	230
5.3.1. Mécanismes de base	230
5.3.2. Batteries de diffusion	231
5.3.3. Utilisation et traitement des données	234
Références bibliographiques	236

6. Mesures dynamiques de masse	239
6.1. Introduction.....	239
6.2. La jauge bêta.....	239
6.2.1. Principe de la mesure.....	239
6.2.2. Conception des instruments.....	240
6.2.3. Limites d'utilisation.....	240
6.3. Cristaux piézo-électriques.....	241
6.3.1. Principe de la mesure.....	241
6.3.2. Méthodes de collection.....	241
6.3.3. Limites d'utilisation.....	242
6.4. Microbalances à éléments oscillants.....	243
6.4.1. Principe de la mesure.....	243
6.4.2. Limites d'utilisation.....	244
Références bibliographiques	245
7. Étalonnage des instruments – production d'aérosols étalons	245
7.1. Introduction.....	245
7.2. Généralités sur la génération des aérosols.....	246
7.3. La dispersion.....	247
7.3.1. Dispersion de solutions.....	247
7.3.2. Dispersion de suspensions.....	252
7.3.3. Dispersion de poudres.....	253
7.4. Séchage des gouttelettes.....*	253
7.5. Production de vapeur et condensation contrôlée.....	254
7.5.1. Production de vapeur.....	254
7.5.2. Condensation contrôlée.....	255
7.6. Classification.....	256
7.6.1. Classification électrostatique.....	256
7.6.2. Classification inertielle.....	258
7.7. Conditionnement électrostatique.....	259
7.8. Conclusions – Synthèse.....	260
Références bibliographiques	261
CHAPITRE 6 : Applications	
1. Introduction	263
2. Prélèvement des aérosols aux postes de travail	263
2.1. Échantillonnage des aérosols aux postes de travail.....	264
2.2. Spécification des performances des dispositifs de prélèvement.....	266
2.3. Dispositifs de prélèvement des aérosols.....	267
2.3.1. Prélèvement statique ou d'ambiance.....	267
2.3.2. Prélèvement personnel.....	270
2.3.3. Mesure de la granulométrie.....	273
2.4. Conclusion.....	273
3. Mesure de la contamination particulaire dans les “salles propres”	274
3.1. Les “salles propres”.....	274
3.2. Méthodologie de la mesure.....	276

3.2.1. Nature du problème	276
3.2.2. Résolution en temps	276
3.2.3. Nature discrète des données – Aspect statistique.....	276
3.2.4. Durée et volume du prélèvement.....	277
3.2.5. Test de signification statistique.....	279
3.2.6. Échantillonnage spatial.....	280
3.3. Instrumentation	281
3.3.1. Mesure des concentrations.....	281
3.3.2. Mesure de la distribution en dimensions.....	282
Références bibliographiques.....	284
 CHAPITRE 7 : Synthèse.....	 287
 Index.....	 293

Les aérosols doivent être pris en compte dans de nombreux domaines industriels :

- filtration,
- épuration de l'air,
- climatisation,
- salles à empoussièrement contrôlé...

Ils comptent parmi les principaux vecteurs de la pollution atmosphérique, et interviennent dans :

- la formation des nuages et des précipitations,
- le bilan radiatif de l'atmosphère,
- les échanges océan-atmosphère,
- la radioactivité atmosphérique naturelle ou accidentelle...

Ils ont également une influence sur la visibilité.

Cet ouvrage constitue l'unique référence globale en langue française sur un sujet d'importance majeure. Il s'appuie sur des fondements théoriques rigoureux pour apporter au lecteur des éléments concrets adaptés au terrain et à l'entreprise.

André Renoux

Professeur à l'université Paris-XII

*Directeur du Laboratoire de physique des aérosols
et de transfert des contaminations*

*Fondateur et directeur du DESS Science des aérosols,
génie de l'aérocontamination*

*Président de l'Asfera, Association française d'études
et de recherches sur les aérosols*

*Président de l'Opqup, Office professionnel de qualification
des entreprises de l'ultrapropreté*

Denis Boulaud

Directeur de recherches au Commissariat à l'énergie atomique

Professeur à l'Institut national des sciences et techniques nucléaires

Chef du Laboratoire de physique et de métrologie des aérosols de l'IPSN

*Vice-président de l'Asfera, Association française d'études et de recherches
sur les aérosols*

2-7430-0231-X



9782743002312

