



C O L L E C T I O N
DIRIGÉE PAR JEAN BORNAREL

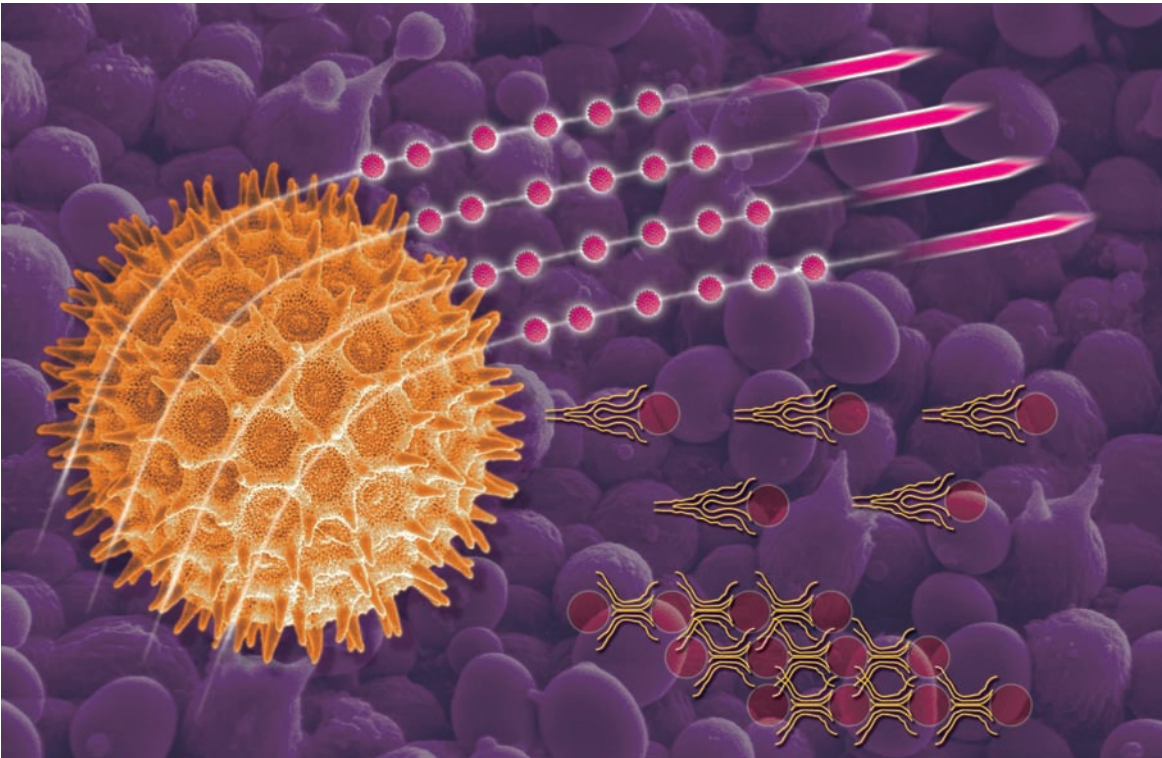
G R E N O B L E

S C I E N C E S

LES MILIEUX AÉROSOLS ET LEURS REPRÉSENTATIONS



■ Alain MAILLIAT



**LES MILIEUX AÉROSOLS
ET LEURS REPRÉSENTATIONS**

Grenoble Sciences

Grenoble Sciences est un centre de conseil, expertise et labellisation de l'enseignement supérieur français. Il expertise les projets scientifiques des auteurs dans une démarche à plusieurs niveaux (référés anonymes, comité de lecture interactif) qui permet la labellisation des meilleurs projets après leur optimisation. Les ouvrages labellisés dans une collection de Grenoble Sciences ou portant la mention « Sélectionné par Grenoble Sciences » (« *Selected by Grenoble Sciences* ») correspondent à :

- » des projets clairement définis sans contrainte de mode ou de programme,
- » des qualités scientifiques et pédagogiques certifiées par le mode de sélection (les membres du comité de lecture interactif sont cités au début de l'ouvrage),
- » une qualité de réalisation certifiée par le centre technique de Grenoble Sciences.

Directeur scientifique de Grenoble Sciences

Jean BORNAREL, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1

On peut mieux connaître Grenoble Sciences en visitant le site web :

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr>

On peut également contacter directement Grenoble Sciences :

Tél (33) 4 76 51 46 95, e-mail : *grenoble.sciences@ujf-grenoble.fr*

Livres et pap-ebooks

Grenoble Sciences labellise des livres papier (en langue française et en langue anglaise) mais également des ouvrages utilisant d'autres supports. Dans ce contexte, situons le concept de **pap-ebook** qui se compose de deux éléments :

- » un **livre papier** qui demeure l'objet central avec toutes les qualités que l'on connaît au livre papier,
- » un site **web corrélé** ou site **web compagnon** qui propose :
 - › des éléments permettant de combler les lacunes du lecteur qui ne posséderait pas les prérequis nécessaires à une utilisation optimale de l'ouvrage,
 - › des exercices de training,
 - › des compléments permettant d'approfondir, de trouver des liens sur internet, etc.

Le livre du **pap-ebook** est autosuffisant et certains lecteurs n'utiliseront pas le site web compagnon. D'autres pourront l'utiliser, et chacun à sa manière. Un livre qui fait partie d'un **pap-ebook** porte en première de couverture un logo caractéristique et le lecteur trouvera le site compagnon à l'adresse internet suivante :

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr/pap-ebook/nom de l'auteur du livre>

Grenoble Sciences bénéficie du soutien du **Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche** et de la **Région Rhône-Alpes**
Grenoble Sciences est rattaché à l'**Université Joseph Fourier de Grenoble**

LES MILIEUX AÉROSOLS ET LEURS REPRÉSENTATIONS

Alain MAILLIAT



17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf - BP 112
91944 Les Ulis Cedex A - France

Les milieux aérosols et leurs représentations

Cet ouvrage, labellisé par Grenoble Sciences, est un des titres du secteur Sciences de la matière Collection Grenoble Sciences d'EDP Sciences, qui regroupe des projets originaux et de qualité. Cette collection est dirigée par **Jean BORNAREL**, Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1.

Comité de lecture de l'ouvrage

- › **J. P. HULIN**, Directeur de Recherche CNRS, laboratoire FAST (Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques), Orsay
- › **N. MIDOUX**, Professeur à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1
- › **B. OESTERLÉ**, Professeur à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1

Cet ouvrage a été suivi par **Laura CAPOLO** pour la partie scientifique et par **Anne-Laure PASSAVANT** du centre technique Grenoble Sciences pour sa réalisation pratique.

L'illustration de couverture est l'œuvre d'**Alice GIRAUD**, d'après : *Convolvulaceae Pollen* - Darmouth Electron Microscope Facility, *Agaric spores* - Darmouth Electron Microscope Facility et des éléments fournis par l'auteur.

Autres ouvrages labellisés sur des thèmes proches (chez le même éditeur)

Introduction à la mécanique statistique (E. Belorizky & W. Gorecki) • *Mécanique Statistique. Exercices et problèmes corrigés* (E. Belorizky & W. Gorecki) • *La Cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels* (J. P. Franc et al.) • *La Turbulence* (M. Lesieur) • *Magnétisme : I Fondements, II Matériaux* (Sous la direction d'E. du Trémolet de Lacheisserie) • *Du soleil à la terre. Aéronomie et météorologie de l'espace* (J. Liliensten & P.L. Blelly) • *Sous les feux du Soleil, vers une météorologie de l'espace* (J. Liliensten & J. Bornarel) • *Mécanique. De la formulation lagrangienne au chaos hamiltonien* (C. Gignoux & B. Silvestre-Brac) • *Problèmes corrigés de mécanique et résumés de cours. De Lagrange à Hamilton* (C. Gignoux & B. Silvestre-Brac) • *La Mécanique Quantique. Problèmes résolus, Tome I et II* (V.M. Galitski, B.M. Karnakov, V.I. Kogan) • *Description de la symétrie. Des groupes de symétrie aux structures fractales* (J. Sivardière) • *Symétrie et propriétés physiques. Des principes de Curie aux brisures de symétrie* (J. Sivardière) • *Physique des diélectriques* (D. Gignoux & J.C. Peuzin) • *Physique des plasmas collisionnels. Applications aux décharges hautes fréquences* (M. Moisan & J. Pelletier) • *Energie et environnement. Les risques et les enjeux d'une crise annoncée* (B. Durand) • *Hydrothermalisme. Spéciation métallique hydrique et systèmes hydrothermaux* (M. Chenevoy & M. Piboule) • *Les roches, mémoire du temps* (G. Mascle)

et d'autres titres sur le site internet :

<http://grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr>

ISBN 978-2-7598-0553-2

© EDP Sciences, 2010

SOMMAIRE

Sommaire	I
En guise de préface	1
Remerciements	5
Chapitre 1. Descriptions physiques	9
Chapitre 2. Descriptions statistiques	37
Chapitre 3. Représentations des milieux aérosols	77
Chapitre 4. Transport et dépôts d'aérosols	107
Chapitre 5. Transferts de masse entre gaz et particules	153
Chapitre 6. Transferts de masse entre particules : agglomérations, fragmentations	181
Chapitre 7. Applications dans les conduites et les enceintes	225
Chapitre 8. Applications en milieux naturels	273
Annexe A. Compléments mathématiques	305
Annexe B. Compléments de probabilité	317
Index	337

Vj ku' r ci g' k p v g p v k q p c m { ' i g h v' d r e p m

EN GUISE DE PRÉFACE

Cet ouvrage est destiné aux scientifiques, ingénieurs et étudiants (niveau bac + 4 et au-delà) qui ont déjà de bonnes bases en mécanique des milieux continus, en particulier, en mécanique des fluides et qui doivent acquérir les connaissances nécessaires au développement d'études, de recherches, d'outils de simulation ou d'applications liées aux milieux aérosols dans des contextes environnementaux, industriels ou de santé humaine. Des exemples d'utilisations de ces connaissances permettent de familiariser le lecteur avec diverses configurations pratiques comme conduites, filtres, enceintes et couverts végétaux.

L'ouvrage est construit de façon à permettre plusieurs types d'approches.

La première sera celle des étudiants d'universités et des écoles d'ingénieurs pour lesquels l'ouvrage contient l'ensemble des connaissances de base de la discipline des aérosols (à l'exception des aspects de métrologie). Cet ensemble de savoirs correspond aux enseignements dispensés par l'auteur depuis 1992 dans divers établissements. Une fois l'étudiant aguerri et selon sa spécialité de 3^{ème} année d'école d'ingénieur ou son sujet de thèse, il trouvera, dans le même ouvrage, les développements théoriques qui lui seront nécessaires.

La seconde approche est celle des spécialistes des modèles mathématiques et de la simulation qui ont à entreprendre un travail sur les milieux aérosols, (l'auteur eut cette pratique à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire). Ils trouveront dans un même ouvrage les lois physiques des phénomènes qui affectent les particules, les outils statistiques indispensables du fait de la variabilité de ces milieux et enfin les méthodes pour en obtenir des équations de bilans. Ces spécialistes, selon qu'ils auront une expertise en matière de physique et/ou de statistiques des particules aérosols, pourront ignorer les chapitres correspondants. Pour des configurations géométriques simples – conduites, enceintes – ils trouveront directement dans l'ouvrage les bilans traditionnels des milieux aérosols sans avoir à utiliser des développements qui leurs seraient inutiles. En revanche, en présence de configurations géométriques complexes et/ou aléatoires et/ou en mouvements – milieux urbains, couverts végétaux, canopées, . . . – ils tireront profit des méthodes de construction de bilans originaux développées dans l'ouvrage à partir des opérateurs filtres, des moyennes en probabilité et de leur combinaison.

Enfin, l'ouvrage est pourvu de deux annexes qui regroupent les outils mathématiques non conventionnels qui y sont utilisés (opérateurs filtres, éléments de la théorie des probabilités, processus aléatoires, etc.).

La représentation des milieux aérosols et le développement d'outils de prédiction requièrent que les phénomènes physiques agissant sur les particules soient connus.

On a donc été amené dans cet ouvrage à proposer un exposé rapide de ces principaux mécanismes. En revanche, l'objectif n'étant pas l'étude détaillée de la physique des aérosols mais la représentation de ces milieux, les exposés fournis peuvent ne pas totalement correspondre aux besoins que pourraient rencontrer l'ingénieur ou le chercheur dans le cadre de ses propres applications. Dans cette circonstance, il consultera un ouvrage dédié à ces aspects de physique des particules aérosols, par exemple¹.

Les études et applications relatives aux milieux aérosols sont d'une étonnante variété, on s'en convainc en lisant le paragraphe "Origines des aérosols" dans le premier chapitre. Des choix sur les thèmes à inclure dans cet ouvrage ont donc été faits pour lui conserver un volume raisonnable, ceci en fournissant néanmoins la plus grande part des connaissances nécessaires à la maîtrise de la discipline. Cet ouvrage est par conséquent incomplet. Le choix de l'auteur a été de présenter les savoirs et les méthodes les plus souvent mis en œuvre dans des applications pratiques, qu'il s'agisse de questions industrielles ou environnementales. Par ailleurs, l'objectif de fournir un ouvrage destiné à l'enseignement a également imposé d'en exclure des aspects trop spécialisés.

Pour chaque thème exposé, l'auteur a tenté de respecter deux règles. La première consiste à privilégier les concepts au détriment des recettes techniques. En effet, seule la maîtrise des concepts principaux d'une discipline permet de résoudre les cas variés et complexes que l'on rencontre dans les applications. La seconde règle est de ne traiter que de situations suffisamment simples. L'expérience a appris à l'auteur que l'intelligence d'une discipline ne requiert pas l'examen de situations complexes. Mieux, au stade de l'enseignement, il faut les éliminer. A défaut, les idées maîtresses de la discipline n'émergent que peu, voire pas, des acrobaties des calculs et du foisonnement des moyens techniques que la complexité impose. L'étudiant, s'il n'a pas été d'emblée rebuté, a plus acquis des recettes et des trucs techniques qu'une maîtrise de la discipline.

Chapitre 1. Il s'agit d'un exposé que l'on peut qualifier de leçon de choses. Sa lecture peut être entreprise sans connaissances préalables du sujet. Il donne au lecteur le vocabulaire et les définitions qui permettent de décrire les caractéristiques des milieux aérosols. Sont ainsi fournies les définitions relatives à la forme des particules, leur composition, leur concentration dans le milieu porteur et les différentes façons d'en mesurer les dimensions. Ces définitions sont accompagnées par des estimations numériques afin que le lecteur devienne familier des ordres de grandeur rencontrés dans la pratique des milieux aérosols.

Chapitre 2. Il est consacré aux méthodes statistiques pour les milieux aérosols. C'est une partie de la discipline assez peu appréciée des étudiants mais qu'il est indispensable de maîtriser. En effet, ces milieux présentent une telle variabilité que les possibilités de décrire et de prédire leurs comportements imposent l'utilisation de ces méthodes statistiques. L'étude du chapitre ne nécessite du lecteur aucune connaissance préalable en statistique. Les concepts et définitions des quantités nécessaires aux milieux aérosols sont établis à partir de considérations élémentaires. Des exemples de calculs de situations simples sont fournis au lecteur pour parfaire sa pratique de ces méthodes statistiques.

1 D. BOULAUD et A. RENOUX, *Les aérosols. Physique et Métrologie*, Te. Et Doc., Lavoisier 1998.

Chapitre 3. Ce chapitre a un double objectif. Le premier consiste à définir les quantités physiques permettant de représenter les milieux aérosols multi constituants. Le second est d'établir une relation – dite équation de bilan de transport – qui lie les variations, en temps et en espace de ces quantités du fait des divers mécanismes qui affectent la distribution des particules, ceci afin de prédire les évolutions de milieux aérosols. Ce chapitre est la clé de voute de l'ouvrage et probablement sa partie la plus théorique. Il peut être abordé de deux façons selon le besoin du lecteur. La première, la plus aisée, consiste à ignorer le début du chapitre et à aller directement à l'expression de l'équation classique du transport d'un milieu aérosol. Cette démarche suffira à ceux qui ont à utiliser des outils de prédiction déjà existants ou qui doivent développer ces outils pour des applications dont la configuration spatiale est relativement simple et stable dans le temps, par exemple, le comportement d'un milieu aérosol dans une enceinte ou son transport dans une conduite de ventilation. La seconde approche est destinée aux étudiants et chercheurs qui ont à développer des outils de prédiction dans des situations complexes géométriquement, variables dans le temps, voire présentant des caractères aléatoires. Ces situations complexes sont en fait très communes et d'une grande importance environnementale. Que l'on pense, par exemple, à la détermination des dépôts d'aérosols – qui s'agisse de polluants ou de pollens – à la traversée des couverts végétaux : prés, cultures céréalières, forêts qui possèdent, en général, un très grand nombre de surfaces de collecte dont les mouvements ont un aspect aléatoire. Compte tenu de son importance, cette situation est d'ailleurs examinée en détail au chapitre 8 à l'aide du formalisme développé dans ce chapitre 3. Pour aborder utilement cette partie théorique du début du chapitre 3 le lecteur devra avoir déjà une bonne connaissance de la mécanique des fluides et, si possible, des milieux poly-phasiques, bien que les éléments essentiels de cette dernière discipline utiles ici soient rapidement exposés. Les outils mathématiques particuliers utilisés dans ce chapitre – opérateur filtre et loi de probabilité sont fournis dans deux annexes dédiées.

Chapitre 4. On y examine les principaux mécanismes physiques responsables du transport et des flux de particules. Ils sont regroupés en trois catégories. Les flux qui résultent des interactions avec le mouvement du gaz porteur tels les flux d'échappement inertiel et turbulent. Les flux qui sont imposés par des champs de forces comme la sédimentation ou la thermophorèse. Enfin, ceux qui proviennent de sollicitations aléatoires qui se traduisent par des phénomènes de diffusion comme l'agitation brownienne et la turbulence.

Chapitre 5. Il s'agit ici de traiter des questions d'échanges de matière entre les particules aérosols multi composants et la phase gazeuse qui les contient. On commence par y établir la forme générale du terme dit d'interaction gaz-particule qui doit être porté dans l'équation maitresse pour rendre compte de ces échanges. On y examine ensuite deux catégories d'échanges de masse souvent rencontrées dans les applications, à savoir, les mécanismes d'évaporation (ou de condensation) de particules constituées d'un soluté et le phénomène d'évolution liée à l'hygroscopicité de l'aérosol.

Chapitre 6. On y traite des questions d'échanges de matière entre aérosols qui ont reçus le nom générique d'agglomération et fragmentation des particules. Le début du chapitre est consacré à l'établissement de la forme générale du terme qui doit être porté dans l'équation maitresse pour rendre compte de ces échanges. On poursuit le

chapitre en montrant comment s'exprime pratiquement ce terme général pour différents phénomènes physiques responsables d'agglomérations.

Chapitre 7. Ce chapitre est destiné à rendre familière la mise en œuvre de l'équation de transport au lecteur. On y traite du transport et des dépôts aérosols dans les conduites, les médias filtrants et les enceintes. Il s'agit des deux grandes familles d'applications rencontrées très fréquemment. La première, se ramène à une équation de bilan qui fournit les caractéristiques du milieu aérosol en sortie de conduite après une certaine longueur de parcours. Il s'agit d'un problème de variation des caractéristiques du milieu aérosol selon une direction de l'espace. La seconde famille d'applications relève de l'évolution dans le temps d'un milieu aérosol contenu dans un domaine de l'espace.

Chapitre 8. Il s'agit ici de représenter le comportement d'un milieu aérosol traversant un couvert végétal – exemple de ce que nous appelons un milieu complexe à structure fine – et d'en déduire les dépôts foliaires. Ce chapitre est une mise en œuvre des outils développés au chapitre trois pour des configurations spatiales compliquées. A titre d'illustration de la méthode, on traite des caractéristiques d'un couvert de conifères et des expressions pratiques des termes de dépôts sont présentées.

Enfin, des éléments de démonstrations ou de définitions mathématiques ont été rassemblés dans deux annexes spécifiques. Ceci permet de conserver à chacun des chapitres une unité d'exposé et évite des digressions fastidieuses au lecteur intéressé principalement par les aspects proprement aérosols. L'annexe A rassemble des compléments de mathématiques tandis que de l'annexe B fournit des compléments sur des notions de probabilité et de diverses propriétés qui s'y rattachent. Le lecteur qui souhaiterait approfondir les notions d'un chapitre ou qui aurait besoin de développer plus avant celles ci pour ses propres recherches ou applications y trouvera, nous l'espérons, les éléments nécessaires.

A. Mailliat

REMERCIEMENTS

L'existence de cet ouvrage est pour partie le résultat des recherches et des programmes expérimentaux dédiés aux questions des transferts et des dépôts d'aérosols menés à L'institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) au sein du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) et à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) auxquels l'auteur a participé au cours de sa carrière. Que ces organismes et leurs personnels que l'auteur a côtoyés à l'occasion de ces programmes trouvent ici ses remerciements.

Les éléments techniques que l'on trouvera présentés dans les pages qui suivent n'auraient pas été réunis en un ensemble organisé dont cet ouvrage est l'aboutissement sans les diverses écoles d'ingénieurs qui ont donné à l'auteur des opportunités d'initier leurs élèves aux milieux aérosols depuis 1992. Que l'Institut Universitaire des Sciences et Techniques de l'Ingénieur (IUSTI) – aujourd'hui Polytech Marseille –, l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN), l'Ecole Supérieure de Mécanique de Marseille (ESM2), puis l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Marseille (EGIM) et aujourd'hui l'Ecole Centrale Marseille (ECM) ainsi que les enseignants que l'auteur y a rencontrés soient assurés de ses remerciements.

Une partie de l'approche théorique développée dans cet ouvrage est issue de recherches consacrées aux dépôts particuliers sur les couverts forestiers auquel l'auteur fut convié par l'un de ses anciens élèves. Ceci l'amena à développer une méthode de représentation de tels milieux à l'aide d'une combinaison de filtre et de moyenne en probabilité. Qu'Alexandre Petroff (Université de Toronto, Canada), Fabien Anselmet (Ecole Centrale Marseille) et Muriel Amielh (CNRS) trouvent ici l'expression des vifs remerciements de l'auteur et de son très amical salut.

Vj k' r ci g' k p v g p v k p c m { ' i g h v ' d r e p m

CHAPITRE 1

DESCRIPTIONS PHYSIQUES

TABLE DES MATIÈRES

1. Descriptions physiques	7
1.1. Objectifs du chapitre	9
1.2. Origines des aérosols	9
1.3. Les milieux aérosols	12
1.3.1. Caractéristiques physiques des aérosols	12
1.3.2. Valeurs caractéristiques	20
1.4. Annexe	28
1.4.1. Propriétés physiques de l'air	28
1.4.2. Propriétés physiques de l'eau à saturation	29
1.4.3. Propriétés physiques de la vapeur d'eau	30
1.4.4. Propriétés physiques des mélanges gazeux	30
1.4.5. Viscosité du mélange de gaz	32
1.4.6. Conductivité thermique du mélange de gaz	32

NOTATIONS

	Latines	Dimensions
a_p	Surface spécifique d'une particule	$[L^2]$
Å	Angström = $10^{-4} \mu\text{m} = 10^{-10} \text{m} = 0,1 \text{ nm}$	$[L]$
c	Vitesse terminale de chute	$[LT^{-1}]$
C^M	Concentration en masse	$[ML^{-3}]$
C^N	Concentration en nombre	$[\#L^{-3}]$
C^S	Concentration en surface	$[L^{-1}]$
d	Diamètre de particule	$[L]$
k	Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Joule K}^{-1}$)	$[ML^2T^{-2}K^{-1}]$
l	Distance inter particules	$[L]$
M	Masse des particules suspendues	$[M]$
m_p	Masse d'une particule	$[M]$
N	Nombre de particules suspendues	$[\#]$
N_A	Nombre d'Avogadro $6,022 \cdot 10^{23}$ par mole	$[\#]$
n	Nombre de moles	$[\#]$
p	Pression	$[ML^{-1}T^{-2}]$
R	Constante des gaz parfaits = $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$[ML^2T^{-2} \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}]$
T	Température en degrés Kelvin	K
V	Volume	$[L^3]$
V_g	Volume occupé par la phase gazeuse	$[L^3]$
V_p	Volume occupé par la phase particulaire	$[L^3]$
v_p	Volume d'une particule	$[L^3]$
x	Fraction molaire	$[\#]$

	Grecques	Dimensions
Λ	Libre parcours moyen	$[L]$
λ	Conductivité thermique	$[MLT^{-3}K^{-1}]$
μ	Viscosité dynamique	$[ML^{-1}T^{-1}]$
μm	Micromètre (ou micron) $1 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ cm} = 10^{-6} \text{ m}$	$[L]$
ν	Viscosité cinématique	$[L^2T^{-1}]$
ρ	Masse volumique	$[ML^{-3}]$

Indices et exposants

aéro	Aérodynamique
G	Relatif au constituant gazeux
g	Relatif à la phase gazeuse
N	Relatif au nombre
M	Relatif à la masse
P	Relatif au constituant de la particule
\wedge	Relatif à une mole
p	Relatif à la phase particulaire
S	Relatif à la surface
Stk	Stokes

CHAPITRE 1

DESCRIPTIONS PHYSIQUES

1.1. OBJECTIFS DU CHAPITRE

Ce premier chapitre donne au lecteur le vocabulaire et les définitions qui permettent de décrire les caractéristiques des milieux aérosols. Sont ainsi fournies les définitions relatives à la forme des particules, leur composition, leur concentration dans le milieu porteur et différentes façons d'en mesurer les dimensions. Ces définitions sont accompagnées par des estimations numériques des quantités précédentes afin que le lecteur devienne familier des ordres de grandeur rencontrés dans la pratique de la mécanique des milieux aérosols.

1.2. ORIGINES DES AEROSOLS

Nous donnons dans cette introduction aux milieux aérosols quelques éléments sur leurs origines, les nuisances dont ils sont responsables mais, également leurs applications.

Les aérosols font partie de notre vie quotidienne. Un fumeur dérange ses voisins car il est un producteur d'aérosols. Sa fumée est constituée d'un ensemble de particules dont les dimensions sont inférieures au micromètre (10^{-6} m). Chaque année au printemps, les personnes sujettes au rhume des foins sont incommodées par une trop grande quantité de pollens dans l'atmosphère. Elles sont les victimes d'un milieu aérosol dont les particules ont de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. Le brouillard est un milieu aérosol qui paralyse la circulation routière et le trafic des aéroports. Ces exemples relèvent des désagréments quotidiens. En revanche, les aérosols peuvent avoir aussi des conséquences particulièrement sévères.

Il y a quelque soixante cinq millions d'années, les dinosaures succombaient aux aérosols. Les paléontologues soutiennent la thèse que notre planète fut percutée par une

météorite d'un diamètre de l'ordre de 10 km. L'impact du bolide avec le sol, parmi d'autres conséquences, pulvérisa une très grande quantité de roches dont une fraction fut transportée dans l'atmosphère sous forme de particules. Là, elles ont constitué un milieu aérosol assez important pour occulter une partie du rayonnement solaire. Ce déficit d'énergie pour la surface terrestre conduisit ensuite à une glaciation qui causa la perte d'un grand nombre d'espèces, dont ces fameux dinosaures.

La version moderne de cette catastrophe est l'hiver nucléaire. La météorite génératrice d'aérosols est remplacée par l'utilisation d'un grand nombre de *mégatonnes* au cours d'un conflit nucléaire. La différence, et non la moindre, entre ce scénario et le précédent réside en ce que les hommes ont remplacé les dinosaures et que nous aurions à subir, à défaut d'une glaciation, pour le moins une période de sévère refroidissement du climat. Ces exemples relèvent d'une thèse en cours de vérification et d'une hypothèse que l'on souhaite ne jamais avoir à tester. Par ailleurs, l'histoire recèle des exemples attestés des conséquences des aérosols.

En 79, en Campanie, au pied du Vésuve, la ville de Pompéi fut recouverte par le très dense aérosol de cendres produit par l'éruption du volcan et nombre de ses habitants succombèrent par asphyxie. Plus proche de nous, en 1986, et, heureusement, d'une importance sans commune mesure, nous avons encore tous présent à l'esprit l'accident de Tchernobyl. La destruction et l'incendie du cœur d'un des réacteurs nucléaires électrogènes conduisirent à l'émission d'un aérosol de particules radioactives. Sa migration dans l'atmosphère, puis les retombées de ses constituants, sous l'effet de différents mécanismes physiques, conditionnèrent l'extension et l'intensité des contaminations. Les relations, par la presse, du cheminement de ce milieu aérosol au-dessus de l'Europe et des prévisions des contaminations locales, nous permirent d'appréhender l'importance de la mécanique des aérosols. Tout récemment, en 2010, les cendres émises par l'éruption du volcan islandais Eyjafjöll, une fois portées à haute altitude, imposèrent l'arrêt presque total du trafic aérien européen pendant une semaine, clouant au sol des centaines de milliers de voyageurs. Les pertes pour le secteur touristique en Europe auraient atteintes 1,7 milliard d'euros.

Les aérosols font partie du tribut que nous devons payer nombre de nos activités industrielles ou domestiques. Nous les rencontrons dans le domaine de la production d'énergie, que l'on pense aux unités de production à combustibles fossiles dont les cheminées produisent de grandes quantités de particules. Ces aérosols peuvent être responsables, suivant leur nature et leur composition chimique, de conséquences sur l'environnement, comme la déforestation, ou sanitaires, en particulier sur la pathologie respiratoire. Les incendies de forêts sont des producteurs d'aérosols. On s'en convainc, à l'occasion d'un incendie important, en observant l'occultation partielle de la lumière du soleil et la coloration du ciel que les particules produisent dans l'atmosphère. Les aérosols émis, selon les tailles et les températures des particules, sont susceptibles de contribuer à la propagation de l'incendie.

Depuis une vingtaine d'années on assiste au développement des nanotechnologies pour diverses industries, par exemple les pneumatiques, les produits cosmétiques, les ciments, les équipements électroniques etc. Ceci conduit à la production massive de particules de diverses formes – sphères, bâtonnets, tubes, anneaux, etc. – ayant une dimension caractéristique entre une dizaine et une centaine de nanomètres (nm), comme

les fameuses particules d'oxyde de titane (Ti O_2) de quelques 10 à 20 nanomètres¹ pour les crèmes solaires, les ciments et les vitrages, les nanoparticules d'argent dans les textiles ou la silice dans des produits alimentaires². Le transport et le transbordement de telles quantités ne va pas sans certaines pertes, l'usure des pneumatiques, l'érosion des ciments, l'utilisation des crèmes solaires sont autant de sources du transfert de ces particules vers l'atmosphère, auxquelles il faudrait encore ajouter les centres de stockage et de récupération de déchets électroniques plus ou moins bien surveillés ou légaux. Après inhalation, certaines tailles de nanoparticules sont déposées dans toutes les parties du système respiratoire et leur petite dimension facilite leurs transferts aux travers des cellules épithéliales et endothéliales jusqu'en des endroits sensibles pour la santé : circulations sanguine et lymphatique, moelle osseuse, ganglions lymphatiques, rate et cœur. L'introduction des nanoparticules dans le corps peut encore se faire par dépôt sur la peau puis pénétration par les canaux lymphatiques. L'ingestion se traduit par une pénétration via le système gastro-intestinal.

Les aérosols constitués de particules de pollen peuvent être transportés par le vent sur des distances importantes et, selon la viabilité du pollen, produire ainsi une dissémination d'une espèce végétale au-delà de sa zone de culture. Si cette propagation concerne une espèce d'organisme génétiquement modifiée (OGM), elle conduira à la contamination des cultures d'espèces non modifiées dans le voisinage du champ d'OGM. Abandonnons ces exemples de nuisances pour considérer les applications des aérosols.

Les méthodes de la mécanique des aérosols sont utilisées dans de nombreux domaines. L'un des plus traditionnels est la météorologie pour laquelle l'étude et la modélisation du développement des systèmes nuageux jouent un rôle essentiel. L'apparition de pluies acides dans certaines régions résultant de l'effet d'entraînement des particules atmosphériques par la pluie a mis en évidence, pour la protection de l'environnement, l'importance d'une bonne connaissance des mécanismes qui affectent le transport, la dispersion et la capture des aérosols.

L'étude de la rétention des particules dans le système pulmonaire permet d'apprécier les risques sanitaires encourus par divers secteurs d'activité comme les mines et les carrières, l'industrie textile ou même la restauration. Les connaissances scientifiques disponibles aujourd'hui³ montrent des effets indésirables des particules dans l'air ambiant sur la santé humaine qu'il s'agisse d'expositions de court terme ou d'expositions chroniques. Les données actuelles tendent à montrer qu'il n'est pas possible d'observer un seuil de concentration en particules en deçà duquel aucun effet sanitaire ne serait constaté. Dans nos régions, l'impact sanitaire prépondérant est dû aux expositions répétées à des niveaux modérés de particules et non aux quelques pics de concentration. Les travaux menés pour l'agglomération parisienne en 2004, en utilisant les données épidémiologiques du Programme de surveillance air et santé (Psas) de l'Institut de

1 Le nanomètre vaut 10^{-9} mètre.

2 Évaluation des risques liés aux nanomatériaux pour la population générale et pour l'environnement, Affset, mars 2010, Saisine n°2008/005.

3 Pollution par les particules dans l'air ambiant : Synthèse des éléments sanitaires en vue d'un appui à l'élaboration de seuils d'information et d'alerte du public pour les particules dans l'air ambiant. Affset, mars 2009 et Impact sanitaire de pollution atmosphérique urbaine – rapport 1 : Estimation de l'impact lié à l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité par cancer du poumon et par maladies cardio-respiratoires en 2002 avec projections d'ici 2020, Afsse, mai 2004.

Veille Sanitaire (InVS), montrent que 97 % de l'impact sanitaire à court terme (décès anticipés hors causes accidentelles) associé aux particules (entendu ici comme indicateur de la pollution atmosphérique, n'excluant donc pas l'influence de co-polluants) était attribuable à des niveaux de PM_{10} ⁴ inférieurs à $50 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ et seulement 3 % à des niveaux supérieurs à $50 \mu\text{gr}/\text{m}^3$, du fait de la rareté de ces événements.

Naturellement, les techniques liées aux questions de conditionnement de l'atmosphère d'ateliers, des salles blanches dans l'industrie de la microélectronique, relèvent des méthodes de la mécanique des milieux aérosoles.

Citons encore, pour mémoire, les applications relatives au transport et à la combustion des combustibles pulvérulents et, pour terminer ce rapide tour d'horizon des domaines d'application des aérosoles, celui de l'agriculture où sont utilisées les dispersions aériennes d'engrais, d'insecticides, pesticides ou autres.

Le tableau 1.1 fournit une estimation – dite estimation *d'Almeida 1991 et al* – des sources de particules d'origines naturelles ou associées aux activités humaines⁵.

1.3. LES MILIEUX AÉROSOLS

Cette partie du chapitre fournit le vocabulaire et les caractéristiques physiques qui permettent de décrire les milieux aérosoles. Sont ainsi abordées les définitions relatives à la forme des particules, à leur composition, à leur concentration dans le milieu et à différentes façons d'en mesurer les dimensions. Ces définitions sont illustrées par des estimations numériques des quantités concernées afin d'accoutumer le lecteur aux ordres de grandeur rencontrés dans la pratique de ces milieux.

1.3.1. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES AÉROSOLS

Les particules d'un milieu aérosole sont décrites par leur forme, on parle de la morphologie des particules ; par leur dimension qui est définie le plus souvent par un diamètre caractéristique ; enfin par leur composition, c'est-à-dire la nature du ou des matériaux qui les constituent. On examine dans cette partie chacune de ces caractéristiques.

CARACTÉRISTIQUES DE MORPHOLOGIE

Les particules peuvent avoir des formes très différentes. Cette variabilité est réduite pour les particules liquides que l'on peut généralement assimiler à des sphères. En revanche, la morphologie des particules solides dépend, à la fois, de la nature du matériau qui les constitue et du mécanisme qui les a produites. L'érosion, le meulage – qui sont deux exemples de mécanismes productifs de particules – ne produisent que très rarement des particules sphériques. L'agglomération de petites particules ne conduit pas plus à la production de particules sphériques.

4 Désigne les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 micromètre.

5 A. RENOUX, D. BOULAUD, *Les aérosoles. Physique et Métrologie*, Ed. Tech.& Doc, Lavoisier, 1998.

Tableau 1.1 : Origines des aérosols, en mégatonnes/an
(particules de rayons inférieurs à 100 μm)

<i>Origines naturelles</i>	
Poussières extraterrestres	10 à 18
Sel marin	1000 à 10000
Poussières désertiques	500 à 2000
Biologiques	80
Conversion gaz–particules (sulfates, organiques, nitrates)	345 à 1100
Débris volcaniques	25 à 250
Total	3 266 à 13 448
<i>Origines humaines</i>	
Emission directe de particules	10 à 90
Conversion gaz–particules (substances carbonées, organiques, nitrates, sulfates)	175 à 325
Feux de forêt	3 à 150
Total	188 à 565
Total Général	3 454 à 14 013

En fait, à l'exception de particules produites par la condensation puis la solidification d'une vapeur, on ne rencontre que rarement des particules solides sphériques. Les images 1.1 à 1.8 fournissent l'illustration de cette variabilité.

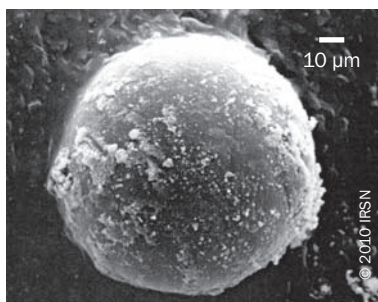


Figure 1.1 – Particule sphérique

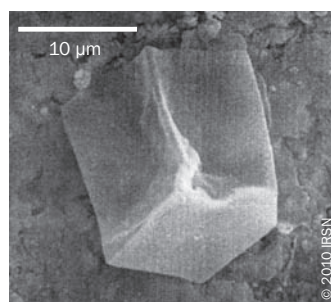


Figure 1.2 – Particule cubique

- diffusion
 - brownienne, 126, 240
 - moléculaire, 160
 - turbulente, 127
- diffusivité relative, 197
- dimension
 - caractéristique, 16
 - caractéristique résultante, 237
- distance d'arrêt, 114
- distribution
 - Béta, 291
 - continue, 187
 - discrete, 190
 - en nombre uniforme, 52
 - lognormale, 57
 - lognormale généralisée, 66
- domaine phasique, 79
- échange avec le gaz porteur, 99
- échappement
 - inertiel, 121
 - turbulent, 124
- échelle de Kolmogorov, 198, 200
- écoulement de Stokes, 207
- effet
 - des solutés, 168
 - Kelvin, 167
- efficacité, 209, 233
 - de collection, 286
 - de filtration, 234
- embryon, 22
- enceinte, 225
- ensemble
 - des occurrences, 81
 - des réalisations, 81
- entraînement par aspersion, 215
- équation
 - de bilan, 94
 - de transport, 93
- équipartition de l'énergie, 146
- erectophile, 292
- espace des observables, 81
- évaporation, 161
- facteur
 - de Cunningham, 140
 - de van't Hoff, 169
- fermetures
 - des dépôts, 282
 - des transports, 280
- fibres, 14, 15
- filtration, 246
- filtre, 78
- fluctuation thermodynamique, 84
- flux
 - d'échappement, 120
 - de diffusion, 125
 - de migration, 130
 - de particules, 108
- fonction
 - de distribution, 40
 - de distribution en masse, 46
 - de distribution en nombre, 91
 - de distribution en surface, 47
 - erf, 59, 70
 - indicatrice, 83
 - statistique, 38
- formule de Stokes, 112
- fragmentation, 99, 182
- fumée du tabac, 22
- gaz
 - parfait, 160
 - porteur, 85
- globule rouge, 22
- hauteur de déplacement, 289
- hétérogène, 20
- homogène, 20
- humidité relative, 154
- hygroscopicité, 171
- hygroscopique, 171
- index foliaire, 293
- infra rouge, 22
- interaction, 27
 - de sillages, 26
- ISO, 24
- isométrique, 15
- lessivage, 216
- libre parcours moyen, 21, 139
- loi
 - de Newton, 111
 - de Raoult, 168
 - de Stokes, 139

- longueur
 - caractéristique, 233
 - caractéristique de dépôt, 236
 - de rugosité, 289
- lumière visible, 22
- masse
 - moléculaire, 21
 - volumique, 30
 - volumique du gaz, 84
- micromètre, 16
- milieu
 - naturel, 273
 - urbain, 273
- mode, 18
 - d'accumulation, 19
- molalité, 170
- moment, 48
- mono-dispersé, 23
- morphologie, 12
- moyenne
 - de la fonction, 48
 - en probabilité, 78
- nanomètre, 16
- nanoparticule, 19
- nébuliseur, 23
- nombre
 - de Knudsen, 135, 139
 - de Nusselt, 162, 244
 - de Peclet, 243
 - de Reynolds, 112, 132, 299
 - de Schmidt, 243, 299
 - de Sherwood, 160, 244, 247, 299
 - de Stokes, 117
- noyau
 - d'agglomération, 187, 193
 - de condensation, 24
 - turbulent, 266
- nucléation, 99, 154
 - homogène, 22
- opérateur filtre, 78
- particule
 - fine, 19
 - fluide, 83
 - grossière, 19
 - ultrafine, 19
- périmètre de dépôt, 228
- perméance, 233
 - totale, 234
- phase, 77
 - particulaire, 85
- plagiophile, 292
- planophile, 292
- plaquette, 14
- platelet, 15
- PM₁₀, 20
- PM₁, 20
- PM_{2,5}, 20
- point de déliquescence, 172
- pollen, 23
- poly-dispersé, 23
- poly-phasique, 77
- poudre de lait, 23
- propriétés
 - de l'air, 28
 - de l'eau à saturation, 29
 - de la vapeur d'eau, 30
- quantité filtrée, 82
- rabattement, 215
- rayon
 - du volume moyen en nombre, 50
 - médian en masse, 51
 - médian en nombre, 50
 - médian en surface, 51
 - moyen en masse, 51
 - moyen en nombre, 50
 - moyen en surface, 50
- rayonnement ultra-violet, 22
- rayons
 - X, 22
 - γ , 22
- régime
 - de conduction, 165
 - de diffusion, 165
 - général, 166
- région
 - externe, 266
 - interne, 266
- répartition
 - en masse, 45
 - en surface, 47
 - numérique, 39