



Aérosols atmosphériques : propriétés et impacts climatiques

Olivier Boucher

Boucher, Olivier

Springer, Paris

Ingénierie et développement durable

ISBN: 978-2-8178-0054-7

Table des Matières

Aérosols atmosphériques

Propriétés et impacts climatiques

Olivier Boucher

Springer

1	Introduction générale	1
1.1	Le système climatique	1
1.2	Bilan énergétique et composition de l'atmosphère	2
1.3	Le cycle de l'eau	3
1.4	Aérosols et changement climatique	4
1.5	Plan de cet ouvrage	5
2	Les aérosols atmosphériques	7
2.1	Définitions	7
2.2	Les sources d'aérosols et de précurseurs d'aérosols	9
2.2.1	Les sels marins	9
2.2.2	Les poussières désertiques	9
2.2.3	Les aérosols volcaniques	10
2.2.4	Les aérosols biogéniques	10
2.2.5	Les aérosols de combustion de la biomasse	10
2.2.6	Les aérosols de combustion des fuels fossiles	11
2.3	Distribution spatiale et temporelle des aérosols	12
2.4	Interactions aérosol-nuage-rayonnement	13
2.5	Effets climatiques des aérosols	15
3	Propriétés physiques, chimiques et optiques des aérosols	17
3.1	Mode fin, mode d'accumulation, mode grossier	17
3.2	Distribution en taille	18
3.3	Composition chimique	20
3.3.1	Notion de mélange d'aérosols	21
3.3.2	Aérosols inorganiques	22
3.3.3	Aérosols de carbone suie	22
3.3.4	Aérosols organiques	22
3.4	Indice de réfraction	23
3.5	Déliquescence, efflorescence, phénomène d'hystérésis	24
3.6	Définition des paramètres optiques	26
3.6.1	Sections efficaces d'absorption et de diffusion	26

3.6.2Épaisseur optique et coefficient d'(...) ngström	27
3.6.3Fonction de phase	28
3.6.4Fraction de diffusion vers le haut	29
3.7Calcul des propriétés optiques des aérosols	30
3.8Un mot sur les particules non sphériques	33
3.9Aérosols et visibilité atmosphérique	33
4Modélisation des aérosols	37
4.1Introduction	37
4.2Émissions	38
4.2.1Généralités	38
4.2.2Combustibles fossiles, biocarburants et autres sources anthropiques	38
4.2.3Feux de végétation	39
4.2.4Sels marins	40
4.2.5Poussières désertiques	41
4.2.6Diméthylsulfure	43
4.2.7Composés organiques volatils biogéniques	45
4.2.8Resuspension	45
4.3Processus atmosphériques	46
4.3.1Nucléation	46
4.3.2Condensation de composés semi-volatils	47
4.3.3Coagulation	48
4.3.4Production d'aérosols dans les nuages	49
4.3.5Dépôt humide ou lessivage	50
4.3.6Dépôt sec	52
4.3.7Sédimentation	52
4.3.8Transport des aérosols	54
4.4Approches de modélisation	54
4.4.1Approche massique	54
4.4.2Approche sectionnelle	55
4.4.3Approche modale	57
4.5Exemple: le cycle du soufre	57
5Interactions matière-rayonnement et transfert radiatif	61
5.1Le rayonnement électromagnétique	61
5.1.1Généralités	61
5.1.2Définitions	63
5.2Interactions rayonnement-matière	65
5.2.1Matière, énergie et spectre de raies	65
5.2.2Intensité des raies spectrales	70
5.2.3Forme des raies spectrales	71
5.2.4Processus d'interaction rayonnement-matière	72
5.3Modélisation des processus d'interaction	74
5.3.1Coefficient d'absorption moléculaire	74

5.3.2Fonction de phase de diffusion	75
5.3.3Diffusion moléculaire	76
5.3.4Absorption et diffusion par les aérosols	77
5.3.5Fonction d'émission	80
5.4Transfert radiatif dans l'atmosphère	82
5.4.1Équation du transfert radiatif	82
5.4.2Extinction seule	84
5.4.3Milieu diffusant	85
5.4.4Atmosphère plan parallèle	85
5.4.5Résolution de l'équation de transfert	86
5.5Bandes d'absorption, aspects énergétiques, flux actiniques	89
5.5.1Principales bandes d'absorption des molécules atmosphériques	89
5.5.2Flux radiatif	91
5.5.3Méthodes à deux flux	92
5.5.4Loi de Stefan-Boltzmann	93
5.5.5Bilan radiatif	93
5.5.6Flux actiniques	95
5.5.7Polarisation du rayonnement	97
6Mesure des aérosols par télédétection et techniques in situ	101
6.1Introduction à la télédétection des aérosols	101
6.2Télédétection passive: mesure de l'extinction	105
6.2.1Principes généraux	105
6.2.2Photométrie depuis le sol	105
6.2.3Mesures d'occultation depuis l'espace	107
6.2.4Mesure de la distribution en taille	108
6.3Télédétection passive: mesure de la diffusion	108
6.3.1Principes généraux	108
6.3.2Mesure du rayonnement diffus depuis le sol	109
6.3.3Mesure du rayonnement diffus depuis l'espace	110
6.4Mesure du rayonnement infrarouge	113
6.4.1Principes généraux	113
6.4.2Mesure du rayonnement infrarouge au nadir	114
6.4.3Mesure du rayonnement infrarouge au limbe	116
6.5Méthodes actives: lidar	116
6.5.1Principes généraux	116
6.5.2Équation du signal lidar	116
6.5.3Le lidar Raman	118
6.6Mesures in situ des aérosols	118
6.6.1Mesures de la concentration en aérosols	119
6.6.2Mesures de la composition chimique en aérosols	120
6.6.3Mesures de la diffusion par les aérosols	120
6.6.4Mesures de l'absorption par les aérosols	121

6.7	Conclusions	121
7	Effets radiatifs des aérosols	125
7.1	Introduction	125
7.2	Effet direct des aérosols	127
7.2.1	Formule simplifiée pour les aérosols diffusants	127
7.2.2	Formule simplifiée pour les aérosols absorbants	129
7.2.3	Calcul de transfert radiatif	131
7.2.4	Estimations globales et sources d'incertitudes	132
7.3	Effet semi-direct des aérosols	134
7.4	Impact radiatif des aérosols sur la neige et la glace	137
8	Effets indirects des aérosols	141
8.1	Introduction	141
8.2	Premier effet indirect sur les nuages d'eau liquide	143
8.2.1	Pression de vapeur saturante de l'eau	143
8.2.2	Effet Kelvin	144
8.2.3	Loi de Raoult	144
8.2.4	Théorie de Köhler	145
8.2.5	Extensions de la théorie de Köhler	146
8.2.6	Noyaux de condensation et sursaturation dans le nuage	148
8.2.7	Effets radiatifs et dynamiques dans les nuages	149
8.2.8	Principe du premier effet indirect	150
8.2.9	Observations et quantification du premier effet indirect	151
8.3	Second effet indirect sur les nuages d'eau liquide	154
8.3.1	Principe du second effet indirect	154
8.3.2	Paramétrisation du taux d'autoconversion	154
8.3.3	Estimations du second effet indirect	155
8.4	Aérosols et nuages de glace	156
8.4.1	Microphysique de la phase glace	156
8.4.2	Impact des aérosols anthropiques sur la phase glace	157
8.5	Aérosols et nuages dus à l'aviation	158
8.5.1	Émissions par les avions	158
8.5.2	Formation des traînées de condensation	158
8.5.3	Estimation de l'impact climatique des traînées	160
9	Réponse du climat aux forçages par les aérosols	163
9.1	Forçage radiatif, rétroactions et réponse climatiques	163
9.1.1	Forçage radiatif	163
9.1.2	Rétroactions climatiques	164
9.1.3	Réponse du climat au forçage par le CO ₂ et efficacité climatique	166
9.1.4	Rétroactions rapides et rétroactions lentes	166
9.2	Réponse du climat aux forçages par les aérosols	168
9.2.1	Réponse à l'équilibre	168
9.2.2	Emissions passées	170

9.2.3	Détection et attribution de l'impact des aérosols	170
9.2.4	Scénarios d'émissions futures	171
9.3	Hiver nucléaire	172
10	Effets biogéochimiques et rétroactions climatiques	175
10.1	Introduction	175
10.2	Impact des aérosols sur les écosystèmes terrestres	176
10.2.1	Rayonnement diffus et productivité primaire	176
10.2.2	Aérosols comme source de nutriments	177
10.2.3	Acidification des précipitations	177
10.3	Impact des aérosols sur les écosystèmes marins	178
10.4	Lien entre aérosols et chimie atmosphérique	179
10.4.1	Lien entre aérosols et chimie troposphérique	179
10.4.2	Impact des aérosols stratosphériques sur la couche d'ozone et le rayonnement ultraviolet	181
10.5	Rétroactions climatiques impliquant les aérosols marins	181
10.5.1	Aérosols issus du DMS	181
10.5.2	Aérosols de sels marins	183
10.5.3	Autres aérosols primaires et secondaires d'origine océanique	184
10.6	Rétroactions climatiques impliquant les aérosols continentaux	184
10.6.1	Aérosols organiques secondaires	185
10.6.2	Aérosols primaires d'origine biogénique	186
10.6.3	Aérosols des feux de végétation	187
10.6.4	Poussières désertiques	188
10.7	Rétroactions impliquant les aérosols stratosphériques	190
11	Aérosols stratosphériques	191
11.1	Introduction	191
11.2	Cycle des aérosols stratosphériques	191
11.2.1	Sources d'aérosols stratosphériques	191
11.2.2	Transport dans la stratosphère	193
11.3	Physico-chimie des aérosols	194
11.4	Historique des aérosols volcaniques	196
11.4.1	Aérosols volcaniques sur la période 1750-2010	196
11.4.2	Quelques éruptions climatiques récentes	196
11.4.3	Méga-éruption	198
11.5	Rôle des aérosols stratosphériques sur le climat	198
12	Ingénierie climatique planétaire	201
12.1	Introduction	201
12.2	Injection d'aérosols stratosphériques	203
12.3	Ensemencement des nuages bas au-dessus des océans	204
12.4	Rôle des rétroactions rapides et lentes	205
12.5	Réflexion sur les échelles de temps	205
	Bibliographie	209
	Annexes	233

A Unités et constantes physiques	235
B Propriétés de la distribution log-normale	237
C Théorie de Mie	239
C.1 Calcul du facteur d'extinction et du paramètre d'asymétrie	239
C.2 Calcul de la fonction de phase	241
C.3 Extension de la théorie de Mie et autres théories	242
D Impact radiatif des aérosols sur la neige et la glace	243
Index	245