

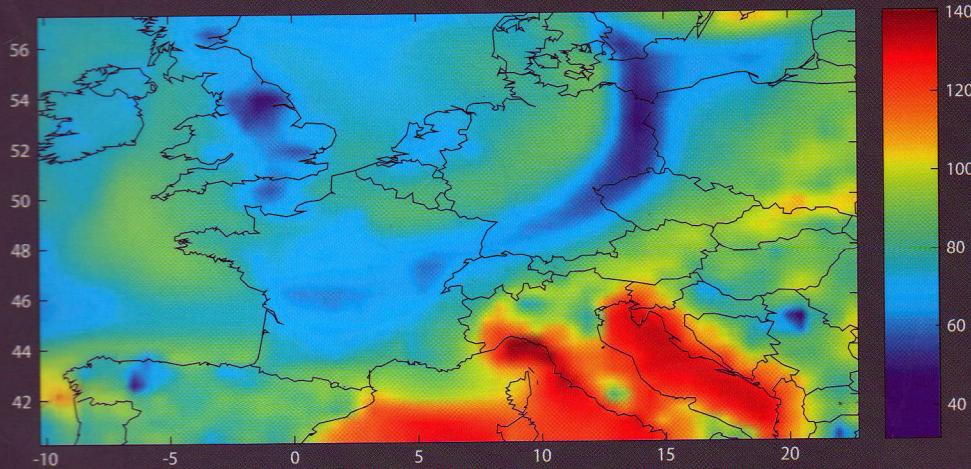


ingénierie  
et développement durable

Bruno Sportisse

# Pollution atmosphérique

Des processus à la modélisation



Springer

## Sommaire

## Sommaire

## **Remerciements**

## Introduction

1.3.5	Évaluation de la pollution atmosphérique et prévision des concentrations de l'ozone	193
1.3.6	Un exemple de pollution photochimique	233
1.3.7	Le rôle du transport métropolitain	198
1.3.8	Éléments sur les sources atmosphériques	199
1.3.9	Autre débat sur les sources atmosphériques	199
1.3.10	Brève introduction à la qualité de l'air	199
1.3.11	Catégorie finale atmosphérique	199
1.3.12	Classification	201
1.3.13	Sols, nuages et pluies	207
1.3.14	Aérosols et particules	208
5.1.1	Généralités	208
5.1.2	Temps de résidence et équilibre et flux	210
5.1.3	Dynamique des éléments sous forme gazeuse	211
5.1.4	Évolution de la composition chimique et usage d'ATM dans ATM	221
5.2.1	Généralités	221
5.2.2	L'interaction dans ATM	221
5.2.3	Précipitation chimique	221
5.2.4	Point de rosée	221
5.2.5	Précipitation chimique	221
5.2.6	Evaporation et condensation	221
5.2.7	Descriptions de l'échange et de l'équilibre	221
5.2.8	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.9	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.10	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.11	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.12	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.13	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.14	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.15	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.16	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.17	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.18	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.19	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.20	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.21	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.22	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.23	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.24	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.25	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.26	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.27	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.28	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.29	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.30	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.31	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.32	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.33	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.34	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.35	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.36	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.37	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.38	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.39	Temp de résidence dans ATM	221
5.2.40	Temp de résidence dans ATM	221
<b>Sommaire</b>		vii
<b>Remerciements</b>		1
<b>Introduction</b>	Pression de vapeur et collation des point de rosée	3
<b>1 Éléments de classifications et ordres de grandeur</b>		23
1.1	Composition chimique de l'atmosphère	23
1.1.1	Espèces traces	23
1.1.2	Phases de la matière	27
1.1.3	Les principales espèces considérées	27
1.1.4	Espèces primaires, espèces secondaires	28
1.2	Structure verticale de l'atmosphère	29
1.2.1	Couches de l'atmosphère	29
1.2.2	Pression atmosphérique	31
1.2.3	Distribution verticale des espèces	34
1.3	Quelques échelles de temps	38
1.3.1	Temps de transport	38
1.3.2	Temps de résidence d'une espèce chimique	40
<b>2 Interaction matière/rayonnement</b>		53
2.1	Notions de transfert radiatif	54
2.1.1	Définitions	54
2.1.2	Transitions admises	57
2.1.3	Émissions	58
2.1.4	Absorption	61
2.1.5	Diffusion	64
2.1.6	Équation du transfert radiatif	69
2.1.7	Compléments pour une particule	70
2.1.8	Albédo	71
2.2	Applications à l'atmosphère terrestre	73
2.2.1	Rayonnement solaire et rayonnement terrestre	73
2.2.2	Bilan radiatif du système Terre/atmosphère	79
2.2.3	Effet de serre	82

2.2.4	Aérosols, nuages et effet de serre . . . . .	90
2.2.5	Pollution atmosphérique et visibilité . . . . .	98
<b>3</b>	<b>Quelques éléments sur la couche limite atmosphérique</b>	<b>109</b>
3.1	Notion d'échelles en météorologie . . . . .	111
3.2	Couche limite atmosphérique . . . . .	112
3.2.1	Généralités . . . . .	112
3.2.2	Classification . . . . .	113
3.3	Stratification thermique et stabilité . . . . .	116
3.3.1	Quelques notions bien utiles . . . . .	116
3.3.2	Stabilité atmosphérique . . . . .	117
3.3.3	Cas d'une atmosphère humide . . . . .	120
3.3.4	Évolution de la stabilité au cours d'une journée . . . . .	122
3.4	Description de la turbulence dans la CLA . . . . .	124
3.4.1	Turbulence dans la CLA . . . . .	124
3.4.2	Dispersion des échelles . . . . .	126
3.4.3	Énergie cinétique turbulente . . . . .	127
3.4.4	Hauteur de mélange et indicateurs de la turbulence . . . . .	129
3.5	Éléments de dynamique atmosphérique . . . . .	132
3.5.1	Rappel sur les équations de la dynamique . . . . .	132
3.5.2	Écoulement dans la CLA . . . . .	136
3.6	Quelques éléments sur le climat urbain . . . . .	145
3.6.1	Forçage thermique et brise urbaine . . . . .	146
3.6.2	Bilan énergétique . . . . .	147
3.6.3	Îlot de chaleur urbain . . . . .	148
3.6.4	Couche limite urbaine . . . . .	149
<b>4</b>	<b>Notions de chimie atmosphérique</b>	<b>155</b>
4.1	Quelques caractéristiques de la chimie atmosphérique	157
4.1.1	Rappels de cinétique chimique . . . . .	157
4.1.2	Réactions photochimiques . . . . .	160
4.1.3	L'atmosphère, un milieu oxydant . . . . .	165
4.1.4	Temps de vie chimique d'une espèce . . . . .	167
4.1.5	Domaines de validité des mécanismes chimiques . . . . .	172
4.2	Chimie stratosphérique de l'ozone . . . . .	175
4.2.1	Destruction et production de l'ozone stratosphérique . . . . .	175
4.2.2	Destruction d'ozone catalysée par les composés bromés et chlorés . . . . .	178
4.2.3	Trou d'ozone polaire . . . . .	180
4.3	Chimie troposphérique de l'ozone . . . . .	184
4.3.1	Quelques notions élémentaires de combustion . . . . .	184
4.3.2	Équilibre photostationnaire de l'ozone troposphérique . . . . .	187
4.3.3	Chaînes d'oxydation des COV . . . . .	189
4.3.4	Régimes chimiques : NO <sub>x</sub> limité / COV limité . . . . .	191

4.3.5	Évaluation des stratégies de réduction des précurseurs de l'ozone . . . . .	193
4.3.6	Un exemple de pollution photochimique : la région Île-de-France . . . . .	197
4.3.7	Le rôle du transport transcontinental . . . . .	198
4.4	Une brève introduction à la qualité de l'air intérieur . . . . .	199
<b>5</b>	<b>Aérosols, nuages et pluies</b>	<b>207</b>
5.1	Aérosols et particules . . . . .	208
5.1.1	Généralités . . . . .	208
5.1.2	Temps de résidence et distribution verticale . . . . .	215
5.1.3	Dynamique des aérosols . . . . .	217
5.1.4	Principales paramétrisations utilisées . . . . .	223
5.2	Aérosols et nuages . . . . .	233
5.2.1	Généralités . . . . .	233
5.2.2	Pression de vapeur saturante de l'eau, humidité relative, point de rosée . . . . .	235
5.2.3	Noyaux de condensation . . . . .	236
5.2.4	Transfert de masse entre la phase gazeuse et les gouttes de nuage . . . . .	241
5.3	Pluies acides et lessivage . . . . .	245
5.3.1	Pluies acides . . . . .	245
5.3.2	Lessivage . . . . .	251
<b>6</b>	<b>Vers la simulation numérique</b>	<b>265</b>
6.1	Équation de dispersion réactive . . . . .	266
6.1.1	Hypothèse de dilution et couplage <i>off line</i> . . . . .	266
6.1.2	Équations d'advection-diffusion-réaction . . . . .	267
6.1.3	Modèles moyens et schémas de fermeture . . . . .	269
6.1.4	Conditions aux limites . . . . .	273
6.1.5	Une hiérarchie de modèles . . . . .	274
6.2	Méthodes numériques pour les modèles de chimie-transport . . . . .	281
6.2.1	Méthodes de séparation d'opérateurs . . . . .	281
6.2.2	Résolution des équations de la cinétique chimique . . . . .	285
6.2.3	Schémas d'advection . . . . .	291
6.3	Résolution numérique de l'équation générale de la dynamique des aérosols (GDE) . . . . .	297
6.3.1	Représentations de la distribution en taille . . . . .	298
6.3.2	Coagulation . . . . .	300
6.3.3	Condensation/évaporation . . . . .	301
6.4	Chaînes modernes de simulation . . . . .	302
6.4.1	Simulation directe . . . . .	302
6.4.2	Incertitudes . . . . .	303
6.4.3	Méthodes avancées . . . . .	303
6.4.4	Comparaison aux données et validation . . . . .	313

6.4.5	Quelques applications	316
6.5	Perspectives	318
<b>Annexes</b>		<b>325</b>
<b>A Unités, constantes et données de base</b>		<b>327</b>
<b>Références</b>		<b>329</b>
<b>Index</b>		<b>339</b>
3.3.1	Quelques notions bien utiles	117
3.3.2	Sensibilité et stabilité	117
3.3.3	Cas d'une atmosphère stable	120
3.3.4	Évolution temporelle d'un émissaire	122
3.3.5	Description de la turbulence dans la CL	124
3.3.6	Turbulence dans la CKA	124
3.3.7	Transition de zéro à une puissance	126
3.3.8	Point de zéro énergie cinétique équivalente	127
3.3.9	Hauteur de répartition	129
3.3.10	Temps de vie des ondes de擾 dans la CL	132
3.3.11	Équation de conservation des équations de la dynamique	132
3.3.12	Bruit soudain de pression - ACO	136
3.3.13	Quelques séries	140
3.3.14	Forçage thermique	146
3.3.15	Bruit d'origine	147
3.3.16	Ret de chaleur urbain	149
3.3.17	Distribution de pression le long de l'axe	149
3.3.18	Couche limite urbaine	151
3.3.19	Hauteur de répartition de la CL	151
3.3.20	Distribution d'achèvement-début de la CL	155
3.3.21	Quelques caractéristiques de la CL	157
3.3.22	Consignes aux pilotes	157
3.3.23	Rappels de cinétique chimique	157
3.3.24	Les principaux types de molécules	160
3.3.25	Valeurs numériques pour les modèles de climat-atmosphère	163
3.3.26	Temps de vie moyen de la CL	163
3.3.27	Modélisation du transfert d'énergie	167
3.3.28	Reproduction des émissions de la couche limite	172
3.3.29	Scénarios de variation des sources	172
3.3.30	Scénarios d'émission	173
3.3.31	Répartition négative de la densité de distribution	173
3.3.32	Production et destruction de radicaux	175
3.3.33	Les grottes (GDE)	175
3.3.34	Les cumuls bruns	176
3.3.35	Microstructures de la circulation en surface	178
3.3.36	Cosignification	179
3.3.37	Coudeaison/gabouison	180
3.4	Chimie troposphérique	184
3.4.1	Quelques notions élémentaires	184
3.4.2	Équilibre photo-chimique	187
3.4.3	Chaine d'oxydation des CO <sub>2</sub>	189
3.4.4	Régimes chimiques	191
3.4.5	Combustion des sures et minéraux	191

Bruno Sportisse



Ingénierie  
et développement durable

*Le développement durable est devenu en quelques années un enjeu majeur au cœur de questions économiques, sociales ou politiques posées à nos sociétés.*

*Dans ce contexte, l'expertise scientifique et technique a toujours joué un rôle clé permettant de diagnostiquer des états ou d'anticiper des évolutions – comme le débat autour du changement climatique en témoigne – ou d'avancer dans la recherche et l'expérimentation de solutions.*

*Comment estimer les impacts des activités humaines sur l'environnement ? Quelles adaptations économiquement viables sont envisageables pour réduire les impacts négatifs ? L'objet de cette collection est de proposer des ouvrages qui répondent à ces questions.*

*L'approche peut être scientifique (lorsque les sujets relèvent encore pour partie de la recherche) ou technique. Les transports, l'habitat, la production d'énergie, la gestion urbaine, la gestion de l'eau ou le management des risques sont les domaines privilégiés de ces ouvrages.*

# Pollution atmosphérique

## Des processus à la modélisation

Qualité de l'air, effet de serre, trou d'ozone, accidents chimiques ou nucléaires... Tous ces phénomènes ont en commun d'être étroitement liés à la composition chimique de l'atmosphère et à la dispersion atmosphérique de polluants.

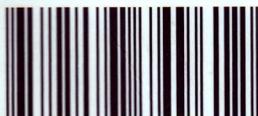
Cet ouvrage a pour objectif de donner les principaux éléments de compréhension des « pollutions atmosphériques ». Quels sont les enjeux ? Quels sont les processus physiques impliqués ? Quel rôle joue à présent l'expertise scientifique, fondée notamment sur la modélisation, dans la prise de décision ?

Issu de dix années de cours à l'École nationale des ponts et chaussées, ce livre s'adresse non seulement à des étudiants de master ou d'écoles d'ingénieurs, à de jeunes chercheurs ou à des enseignants, mais aussi à des professionnels en activité qui veulent avoir une vue synthétique et argumentée sur les sujets traités. Plus généralement, tout « honnête homme », possédant un socle de culture scientifique et désireux d'aller au-delà de la connaissance « grand-public », peut être intéressé par la lecture de cet ouvrage.

Les connaissances requises sont les notions scientifiques de base au niveau licence/master. De nombreux exercices et problèmes permettent d'aborder des sujets actuels.

*Bruno Sportisse est ancien élève de l'École Polytechnique, ingénieur en chef des ponts et chaussées, docteur en mathématiques appliquées et habilité à diriger les recherches en géophysique. Il est directeur depuis 2002 du Centre d'enseignement et de recherche sur l'environnement atmosphérique, un laboratoire commun entre l'École nationale des ponts et chaussées et électricité de France recherche et développement, et co-responsable du projet CLIME de l'Institut national de recherche en informatique et automatique.*

ISBN : 978-2-287-74961-2



9 782287 749612

[springer.com](http://springer.com)