

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	1
<b>Chapitre 1. Définition de la pollution atmosphérique</b> . . . . .	5
1.1. Présentation de la pollution atmosphérique . . . . .	5
1.1.1. Notion d'atmosphère polluée . . . . .	5
1.1.2. Où sont les grandes zones polluées ? . . . . .	7
1.1.3. La composition atmosphérique . . . . .	9
1.2. Concentrations typiques par saisons . . . . .	12
1.3. La chimie gazeuse . . . . .	13
1.3.1. Abondance et durée de vie des espèces . . . . .	13
1.3.2. L'ozone et le cycle des radicaux . . . . .	14
1.3.3. Les régimes chimiques . . . . .	15
1.3.4. Typologie de la pollution urbaine . . . . .	16
1.4. La chimie des aérosols . . . . .	17
1.4.1. Abondance des aérosols . . . . .	18
1.4.2. Distributions en taille . . . . .	19
1.5. La couche limite atmosphérique . . . . .	20
1.5.1. Structure générale . . . . .	20
1.5.2. Cycle diurne et turbulence . . . . .	22
1.5.3. La couche limite urbaine . . . . .	24
<b>Chapitre 2. Observations et législation</b> . . . . .	29
2.1. Les mesures météorologiques . . . . .	30
2.1.1. Les mesures in-situ . . . . .	30
2.1.2. Les mesures par télédétection . . . . .	32

2.2. Les mesures de concentrations atmosphériques . . . . .	36
2.2.1. Les mesures in-situ . . . . .	36
2.2.2. Les mesures par télédétection . . . . .	38
2.2.3. Les micro-capteurs . . . . .	43
2.3. Les campagnes de mesures . . . . .	44
2.4. Les bases de données . . . . .	46
2.5. La législation et les normes . . . . .	47

### **Chapitre 3. Principe général de la modélisation et application à la météorologie . . . . .**

49

3.1. Qu'est-ce qu'un modèle ? . . . . .	49
3.1.1. Définition d'un modèle numérique . . . . .	49
3.1.2. Journaux sur la modélisation . . . . .	51
3.1.3. Les différents types de modèles eulériens . . . . .	51
3.1.4. Quelques modèles météorologiques actuels . . . . .	53
3.2. Les contraintes d'un modèle régional . . . . .	53
3.2.1. Définition du domaine de calcul . . . . .	53
3.2.2. Les conditions initiales et aux limites . . . . .	57
3.2.3. Données de surface . . . . .	59
3.2.4. <i>Nudging</i> et <i>nesting</i> . . . . .	60
3.3. Dynamique, physique et paramétrisations . . . . .	61
3.3.1. Le choix du pas de temps . . . . .	62
3.3.2. Variables diagnostiques et pronostiques . . . . .	63
3.3.3. La couche limite et les flux turbulents . . . . .	64

### **Chapitre 4. Les émissions . . . . .**

69

4.1. Introduction . . . . .	69
4.2. Les émissions anthropiques . . . . .	71
4.2.1. Les inventaires d'émissions . . . . .	71
4.2.2. Les cadastres d'émissions . . . . .	73
4.3. Les émissions biogéniques . . . . .	79
4.3.1. Paramétrisation du flux . . . . .	79
4.3.2. Les bases de données . . . . .	80
4.3.3. Intercomparaison et sensibilité . . . . .	81
4.4. Les émissions des feux de biomasse . . . . .	81
4.4.1. Processus d'émissions surfaciques . . . . .	82
4.4.2. La pyroconvection . . . . .	83
4.5. Les émissions des aérosols minéraux . . . . .	86
4.5.1. Caractérisation de la surface, du sol et de la rugosité . . . . .	86
4.5.2. La prise en compte de la météorologie . . . . .	89

4.5.3. Le calcul des flux d'émissions . . . . .	91
4.5.4. Exemples de flux d'émissions . . . . .	93
4.6. Les émissions des volcans . . . . .	93
4.6.1. Généralités . . . . .	93
4.6.2. Une éruption récente : le volcan islandais en 2010 . . . . .	96
4.6.3. Une éruption ancienne : le Laki en 1783 . . . . .	97
4.7. Les émissions des éclairs . . . . .	97
4.7.1. La fréquence des éclairs . . . . .	99
4.7.2. Estimation de la production de NO . . . . .	103
4.7.3. La part relative entre CG et IC . . . . .	103
4.7.4. Le profil vertical d'émission . . . . .	104
4.7.5. Intercomparaisons et observations . . . . .	104
4.8. Les émissions marines naturelles . . . . .	106
4.8.1. Sels de mer . . . . .	106
4.8.2. Le diméthylsulfure . . . . .	108
4.9. Le pollen . . . . .	109
4.10. En résumé pour les émissions . . . . .	112
<b>Chapitre 5. Les dépôts . . . . .</b>	<b>113</b>
5.1. Le dépôt sec . . . . .	113
5.1.1. Résistance aérodynamique $r_a$ . . . . .	115
5.1.2. Résistance de surface $r_b$ . . . . .	116
5.1.3. Résistance de canopée $r_c$ . . . . .	119
5.2. Le dépôt humide . . . . .	120
5.2.1. Dans les colonnes convectives . . . . .	120
5.2.2. Dans le nuage . . . . .	120
5.2.3. Sous le nuage . . . . .	121
<b>Chapitre 6. La modélisation de chimie-transport . . . . .</b>	<b>125</b>
6.1. Principe des modèles de chimie-transport . . . . .	125
6.2. Conditions initiales et aux limites . . . . .	130
6.3. Prise en compte du transport . . . . .	132
6.3.1. La conservation de la masse . . . . .	132
6.3.2. Le flux horizontal d'advection (u,v) . . . . .	133
6.3.3. Le flux vertical d'advection (w) . . . . .	135
6.3.4. La diffusivité turbulente . . . . .	136
6.4. La chimie gazeuse . . . . .	137
6.4.1. Les réactions chimiques . . . . .	137
6.4.2. Les solveurs . . . . .	138
6.4.3. Les mécanismes chimiques . . . . .	140

6.5. Les aérosols . . . . .	141
6.5.1. Distribution en taille . . . . .	141
6.5.2. Mélange interne ou externe . . . . .	142
6.5.3. Les modèles d'aérosols . . . . .	142
6.6. Le couplage météorologie et chimie . . . . .	147
6.6.1. Les modèles couplés . . . . .	147
6.6.2. Les effets directs . . . . .	149
6.6.3. Les effets indirects . . . . .	150
6.6.4. Incertitudes et perspectives . . . . .	151

## **Chapitre 7. Qualification et optimisation . . . . . 155**

7.1. Qualification des résultats de modélisation . . . . .	155
7.1.1. Peut-on qualifier ou valider un modèle ? . . . . .	155
7.1.2. Les résultats sont-ils bons ? . . . . .	156
7.1.3. Statistiques d'évaluation . . . . .	156
7.2. Les comparaisons aux mesures ou intermodèles . . . . .	160
7.2.1. Comparaisons aux mesures de routines . . . . .	160
7.2.2. Comparaison aux mesures satellites . . . . .	160
7.2.3. Comparaisons aux mesures de campagne . . . . .	162
7.2.4. Comparaisons intermodèles . . . . .	164
7.3. L'adaptation statistique ou <i>tuning</i> . . . . .	166
7.3.1. Modifications des paramètres d'entrée . . . . .	166
7.3.2. Modifications des résultats . . . . .	166
7.4. Les scénarios . . . . .	167
7.4.1. Scénarios de météorologie . . . . .	167
7.4.2. Scénarios d'émissions . . . . .	167
7.4.3. Scénarios sur un processus du modèle . . . . .	168
7.5. Les études de sensibilité . . . . .	169
7.5.1. Sensibilité par modélisation directe . . . . .	170
7.5.2. Sensibilité par modélisation adjointe . . . . .	170
7.6. Les calculs d'ensemble . . . . .	173
7.7. <i>Machine learning</i> . . . . .	177

## **Chapitre 8. Assimilation de données, modélisation inverse et prévision . . . . . 179**

8.1. Assimilation de données . . . . .	179
8.1.1. Assimilation séquentielle . . . . .	181
8.1.2. Assimilation variationnelle . . . . .	182
8.1.3. Applications d'assimilation de données . . . . .	183
8.1.4. Gain de l'assimilation de données en pollution . . . . .	184

---

8.2. La modélisation inverse . . . . .	186
8.3. La prévision . . . . .	188
<b>Chapitre 9. Les impacts de la pollution atmosphérique . . . . .</b>	<b>193</b>
9.1. L'impact de la pollution sur le climat . . . . .	193
9.2. L'impact du climat sur la pollution . . . . .	195
9.3. L'impact de la pollution sur la santé . . . . .	197
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>201</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>247</b>