

# Table des matières

<b>Partie 1. Météorologie</b> . . . . .	1
<b>Introduction de la partie 1. La météorologie et les apports du spatial</b> . . . . .	3
Hervé ROQUET	
<b>Chapitre 1. Sondage opérationnel des variables thermodynamiques de l'atmosphère</b> . . . . .	9
Thomas AUGUST	
1.1. Introduction. . . . .	9
1.2. Exploitation opérationnelle des sondeurs TIR et MW. . . . .	10
1.2.1. Satisfaire des utilisateurs toujours plus exigeants . . . . .	10
1.2.2. Les nuages : un obstacle au sondage et un produit géophysique très utile . . . . .	18
1.2.3. Démontrer et maintenir la qualité des produits. . . . .	24
1.2.4. Différentes stratégies algorithmiques opérationnelles. . . . .	26
1.2.5. Perspectives applicatives. . . . .	29
1.3. Remerciements. . . . .	30
1.4. Bibliographie . . . . .	31
<b>Chapitre 2. Les profils de vent.</b> . . . . .	35
Régis BORDE et Jean PAILLEUX	
2.1. Introduction. . . . .	35
2.2. AMV. . . . .	38
2.2.1. Extraction des AMV . . . . .	38
2.2.2. Production actuelle et perspectives. . . . .	40

2.3. Vents 3D dérivés des sondeurs hyperspectraux. . . . .	42
2.4. Mesure du vent depuis l'espace par lidar Doppler . . . . .	44
2.4.1. La mission Aeolus . . . . .	44
2.4.2. Les mesures du lidar Aladin embarqué sur Aeolus . . . . .	44
2.4.3. L'aboutissement d'un long processus . . . . .	46
2.4.4. Situation en 2022 et perspectives. . . . .	47
2.5. Bibliographie . . . . .	49

### **Chapitre 3. Les variables de surface. . . . . 51**

Jean-François MAHFOUF

3.1. L'observation depuis l'espace de la surface terrestre . . . . .	51
3.2. Les bilans énergétiques en surface et au sommet de l'atmosphère . . . . .	53
3.3. Les surfaces océaniques . . . . .	54
3.3.1. La température de surface . . . . .	54
3.3.2. Le vent de surface. . . . .	57
3.3.3. La glace de mer . . . . .	59
3.4. Les surfaces continentales . . . . .	60
3.4.1. La température de surface . . . . .	60
3.4.2. Le contenu en eau des sols . . . . .	61
3.4.3. L'albédo de surface. . . . .	65
3.4.4. Les propriétés de la végétation . . . . .	66
3.5. Les surfaces enneigées . . . . .	68
3.5.1. La couverture spatiale et l'albédo . . . . .	68
3.5.2. Le contenu en eau équivalent . . . . .	69
3.6. Les évolutions attendues . . . . .	70
3.7. Bibliographie. . . . .	70

### **Chapitre 4. L'assimilation des données satellitaires dans les systèmes de prévision numérique du temps. . . . . 73**

Bill BELL, Jean-Noël THÉPAUT et John EYRE

4.1. Introduction. . . . .	73
4.2. Les premiers satellites météorologiques . . . . .	74
4.3. Assimilation des données satellitaires 1970-2000 . . . . .	76
4.3.1. Les premiers instruments de sondage . . . . .	76
4.3.2. Expérience d'assimilation : les années 1970 . . . . .	77
4.3.3. Expérience d'assimilation : début des années 1980 . . . . .	78
4.3.4. Problèmes survenus à la fin des années 1980. . . . .	79
4.4. Aspects pertinents de la théorie de l'assimilation des données. . . . .	79
4.5. L'ère moderne (2000 à aujourd'hui) . . . . .	81
4.5.1. Stratégies d'assimilation. . . . .	81

4.5.2. Sondeurs infrarouges avancés. . . . .	84
4.5.3. Sondeurs et imageurs micro-ondes. . . . .	86
4.5.4. Modélisation du transfert radiatif. . . . .	88
4.5.5. Incertitudes liées à l'observation . . . . .	88
4.5.6. Vecteurs de mouvement atmosphérique (AMV). . . . .	89
4.5.7. Les diffusiomètres . . . . .	92
4.5.8. Observations par radio-occultation. . . . .	93
4.5.9. Impacts . . . . .	95
4.5.10. Réanalyses . . . . .	96
4.6. Résumé et conclusion. . . . .	97
4.7. Bibliographie. . . . .	98

## **Chapitre 5. Prévision immédiate . . . . . 103**

Thibaut MONTMERLE

5.1. Introduction. . . . .	103
5.2. Les données satellites pour la prévision immédiate . . . . .	105
5.2.1. Satellites défilants. . . . .	105
5.2.2. Satellites géostationnaires . . . . .	106
5.3. Phénomènes observés. . . . .	110
5.3.1. Instabilité de la masse d'air . . . . .	110
5.3.2. Systèmes convectifs . . . . .	111
5.3.3. Caractéristiques des nuages . . . . .	114
5.3.4. Hydrométéores . . . . .	116
5.3.5. Vent . . . . .	117
5.4. Prévision immédiate des phénomènes détectés. . . . .	118
5.4.1. Méthode basée sur le suivi de structures . . . . .	118
5.4.2. Méthode basée sur l'extrapolation d'image. . . . .	118
5.4.3. Méthode basée sur l'intelligence artificielle . . . . .	119
5.4.4. Utilisation de la prévision numérique . . . . .	120
5.4.5. Fusion OBS-PNT . . . . .	121
5.4.6. Prévision probabiliste . . . . .	122
5.5. Perspectives . . . . .	123
5.6. Bibliographie. . . . .	123

## **Chapitre 6. Observation et suivi des cyclones tropicaux depuis l'espace . . . . . 125**

Frank ROUX

6.1. Introduction. . . . .	125
6.2. Imagerie visible et infrarouge . . . . .	126
6.3. Imagerie micro-ondes. . . . .	129

6.4. Sondage micro-ondes . . . . .	132
6.5. Mesures du vent de surface . . . . .	134
6.6. Paramètres océaniques . . . . .	137
6.7. Climatologie des cyclones . . . . .	138
6.8. Conclusion . . . . .	139
6.9. Bibliographie . . . . .	140
<b>Partie 2. Composition atmosphérique . . . . .</b>	<b>143</b>
<b>Introduction de la partie 2. La composition de l'air et les apports du spatial . . . . .</b>	<b>145</b>
Thierry PHULPIN et Claude CAMY-PEYRET	
<b>Chapitre 7. La chimie réactive de la troposphère . . . . .</b>	<b>149</b>
Sarah SAFIEDDINE et Camille VIATTE	
7.1. Introduction. . . . .	149
7.2. Le méthane . . . . .	150
7.3. Les espèces organiques réactives . . . . .	150
7.3.1. L'isoprène . . . . .	152
7.3.2. Autres composés organiques volatils non méthaniques (COV) . . . . .	152
7.4. Les espèces inorganiques réactives . . . . .	154
7.5. Conclusion . . . . .	156
7.6. Remerciements . . . . .	156
7.7. Bibliographie . . . . .	156
<b>Chapitre 8. Polluants majeurs : ozone et particules fines . . . . .</b>	<b>159</b>
Juan CUESTA et Gaëlle DUFOUR	
8.1. Introduction. . . . .	159
8.2. Ozone troposphérique. . . . .	160
8.2.1. Les débuts de l'observation de l'ozone troposphérique par satellite. . . . .	160
8.2.2. Les capacités actuelles de suivi de l'ozone troposphérique . . . . .	161
8.2.3. La synergie multilongueur d'onde pour la surveillance de la pollution à l'ozone . . . . .	164
8.3. Les aérosols de pollution . . . . .	165
8.3.1. Épaisseur optique des aérosols de pollution . . . . .	166
8.3.2. Altitude des aérosols de pollution . . . . .	168
8.4. Bibliographie . . . . .	170

<b>Chapitre 9. Poussières désertiques</b> . . . . .	<b>175</b>
Juan CUESTA	
9.1. Introduction . . . . .	175
9.2. Détection satellitaire qualitative des poussières désertiques . . . . .	176
9.3. Observation satellitaire de l'épaisseur optique des poussières désertiques . . . . .	178
9.4. Profils verticaux des poussières désertiques par lidar spatial . . . . .	179
9.5. Distribution 3D des poussières désertiques par spectromètre infrarouge . . . . .	181
9.6. Conclusion . . . . .	184
9.7. Bibliographie . . . . .	184
<b>Chapitre 10. Les espèces émises par les incendies</b> . . . . .	<b>187</b>
Camille VIATTE et Pasquale SELLITTO	
10.1. Introduction . . . . .	187
10.2. Les gaz issus de la combustion de la biomasse . . . . .	189
10.2.1. Les gaz à effet de serre . . . . .	189
10.2.2. Le monoxyde de carbone (CO) . . . . .	189
10.2.3. Les composés organiques volatils (COV) . . . . .	190
10.2.4. L'ammoniac (NH <sub>3</sub> ) . . . . .	190
10.2.5. L'acide nitreux (HONO) . . . . .	190
10.3. Aérosols issus de la combustion de la biomasse . . . . .	191
10.3.1. Les observations de l'AOD à l'aide d'instruments de visualisation du nadir . . . . .	191
10.3.2. Observations d'extinction à l'aide d'instruments visant au limbe . . . . .	192
10.3.3. Observations par lidar spatial . . . . .	192
10.4. Systèmes de détection d'incendie depuis l'espace . . . . .	193
10.5. Conclusion . . . . .	193
10.6. Remerciements . . . . .	193
10.7. Bibliographie . . . . .	193
<b>Chapitre 11. La chimie stratosphérique</b> . . . . .	<b>197</b>
Claude CAMY-PEYRET et Sarah SAFIEDDINE	
11.1. Introduction . . . . .	197
11.2. La chimie de l'ozone stratosphérique . . . . .	197
11.2.1. L'appauvrissement de l'ozone polaire . . . . .	198
11.2.2. La distribution de l'ozone dans l'Antarctique . . . . .	200
11.2.3. La distribution de l'ozone dans l'Arctique . . . . .	201

11.3. La chimie stratosphérique d'autres espèces . . . . .	201
11.3.1. Chimie de la stratosphère et modèles. . . . .	203
11.3.2. Processus et cycles radicaux pour les grandes familles . . . . .	204
11.3.3. L'exemple du méthane dans la stratosphère. . . . .	205
11.4. Mesures par satellite des espèces à l'état de traces dans la stratosphère . . . . .	207
11.5. Conclusion . . . . .	208
11.6. Remerciements . . . . .	208
11.7. Bibliographie . . . . .	209

**Partie 3. L'atmosphère et le climat . . . . . 211**

**Introduction de la partie 3. L'atmosphère et le climat  
et la contribution de l'espace . . . . . 213**  
Paul POLI

**Chapitre 12. La surveillance climatique . . . . . 217**  
Paul POLI et Jörg SCHULZ

12.1. Notions générales sur le climat . . . . .	217
12.1.1. Le climat . . . . .	217
12.1.2. Phénomènes atmosphériques et climat. . . . .	219
12.1.3. La stabilité du climat . . . . .	222
12.2. Des mesures satellitaires aux produits climatiques . . . . .	223
12.2.1. La détection de l'environnement . . . . .	223
12.2.2. Le rôle des observations satellitaires . . . . .	225
12.2.3. Le concept de variables climatiques essentielles . . . . .	227
12.2.4. Les produits basés sur l'observation . . . . .	229
12.2.5. Produits climatiques basés sur des modèles. . . . .	232
12.3. Enregistrements de données climatiques et estimations de l'incertitude. . . . .	233
12.3.1. Le retraitement des données d'observation, une nécessité. . . . .	233
12.3.2. L'étalonnage . . . . .	234
12.3.3. L'incertitude . . . . .	237
12.4. L'utilisation des enregistrements de données climatiques dans la science et les services climatiques . . . . .	240
12.5. Perspectives d'avenir . . . . .	241
12.6. Bibliographie . . . . .	242

**Chapitre 13. Gaz à effet de serre anthropiques : CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>. . . . . 245**

Cyril CREVOISIER

13.1. Le suivi des gaz à effet de serre anthropiques . . . . .	245
13.1.1. Les cycles biogéochimiques . . . . .	245
13.1.2. Détermination des sources et puits de gaz. . . . .	246
13.1.3. Le réseau global d'observation . . . . .	247
13.2. Apport de l'observation spatiale des gaz à effet de serre . . . . .	248
13.2.1. Spécificités de l'observation des gaz à effet de serre . . . . .	248
13.2.2. Une programmation spatiale particulièrement riche . . . . .	252
13.3. Les techniques de mesure. . . . .	253
13.3.1. Les observations passives dans l'infrarouge . . . . .	254
13.3.2. Les observations passives par réflexion solaire. . . . .	255
13.3.3. Les observations passives par occultation solaire . . . . .	258
13.3.4. Les observations actives par lidar. . . . .	258
13.4. De la mesure du rayonnement au flux de gaz à la surface. . . . .	259
13.4.1. De la mesure du rayonnement aux concentrations de gaz. . . . .	259
13.4.2. De la concentration aux flux. . . . .	261
13.4.3. Principales limitations . . . . .	262
13.5. Les défis pour le futur . . . . .	263
13.5.1. Vers l'observation des émissions anthropiques par imagerie spatiale . . . . .	264
13.5.2. Réduire les biais d'échantillonnage spatiotemporel . . . . .	264
13.5.3. Vers un service opérationnel de suivi des gaz à effet de serre . .	265
13.6. Bibliographie . . . . .	266

**Chapitre 14. Nuages et vapeur d'eau . . . . . 269**

Hélène BROGNEZ, Laurence PICON et Dominique BOUNIOL

14.1. Cycle de l'eau atmosphérique et climat . . . . .	269
14.2. Observation de la vapeur d'eau . . . . .	270
14.2.1. Les capteurs passifs . . . . .	274
14.2.2. Les capteurs actifs. . . . .	276
14.2.3. Homogénéisation et intercomparaisons . . . . .	276
14.3. Observation des propriétés des nuages . . . . .	278
14.3.1. Observations par des instruments passifs . . . . .	281
14.3.2. Observations par des instruments actifs . . . . .	284
14.3.3. Synergie multi-instrument pour l'établissement des climatologies nuageuses . . . . .	291
14.4. Bibliographie . . . . .	295

---

<b>Chapitre 15. Précipitations</b> . . . . .	299
Vincenzo LEVIZZANI et Christopher KIDD	
15.1. Mesures des précipitations à l'échelle mondiale . . . . .	299
15.2. Observation des précipitations par satellite . . . . .	301
15.2.1. Visible/infrarouge . . . . .	302
15.2.2. Micro-ondes passives . . . . .	303
15.2.3. Radar . . . . .	307
15.2.4. Produits fusionnés . . . . .	309
15.3. Observation des précipitations solides . . . . .	311
15.4. Les précipitations et le cycle de l'eau sur Terre . . . . .	313
15.5. Bibliographie . . . . .	318
<b>Annexe 1. Les profils atmosphériques</b> . . . . .	321
Claude CAMY-PEYRET	
<b>Annexe 2. Les paramètres spectroscopiques pour le transfert radiatif</b> . . . . .	329
Claude CAMY-PEYRET	
<b>Annexe 3. Liste des capteurs et satellites cités dans l'ouvrage</b> . . . . .	339
Thierry PHULPIN, Didier RENAUT, Hervé ROQUET et Claude CAMY-PEYRET	
<b>Annexe 4. Capteurs micro-ondes et sondeurs hyperspectraux infrarouges.</b> . . . . .	353
Thierry PHULPIN, Didier RENAUT, Hervé ROQUET et Claude CAMY-PEYRET	
<b>Glossaire</b> . . . . .	359
<b>Liste des acronymes</b> . . . . .	369
<b>Liste des auteurs.</b> . . . . .	387
<b>Index</b> . . . . .	391
<b>Sommaire de <i>Satellites pour les sciences de l'atmosphère 1</i></b> . . . . .	395