

Sylvie Malardel

Fondamentaux *de* **Météorologie**

2^e édition

à l'école du temps



062605

Cepaduès
- éditions -

Table des matières

062605
②

Fondamentaux de météorologie



À l'école du temps

2^e édition

Sylvie MALARDEL



CÉPADUÈS-ÉDITIONS

111, rue Nicolas-Vauquelin
31100 TOULOUSE – France

Tél. : 05 61 40 57 36 – Fax : 05 61 41 79 89
(de l'étranger) + 33 5 61 40 57 36 – Fax : + 33 5 61 41 79 89

www.cepades.com

Courriel : cepades@cepades.com



Table des matières

PROLOGUE	XV
CHAPITRE 1 • INTRODUCTION À LA MÉTÉOROLOGIE	
1.1 Il était une fois l'air	3
1.2 L'énergie du Soleil	8
1.3 Les phénomènes atmosphériques	13
1.3.1 Échelles	13
1.3.2 Perturbations et anomalies	14
1.3.3 Interactions d'échelles	14
1.4 Cause ou effet ?	15
1.5 De l'observation à la prévision opérationnelle	16
CHAPITRE 2 • OBSERVATION DE L'ATMOSPHÈRE	
2.1 Les principaux paramètres à observer	20
2.1.1 La température de l'air	20
2.1.2 La pression atmosphérique	21
2.1.3 Le vent	25
2.1.4 L'humidité de l'air	28
2.1.5 Les précipitations	30
2.1.6 Les nuages	32
2.1.7 La visibilité, la brume et le brouillard	39
2.2 Les observations in situ	40
2.2.1 Les moyens de mesure	40
2.2.2 Les réseaux de mesure	41
2.2.3 Les codes, le pointage et les cartes météorologiques	46
2.3 La télédétection	54
2.3.1 Les satellites météorologiques	54
2.3.2 Les radars météorologiques	63
2.3.3 D'autres moyens de télédétection	72
CHAPITRE 3 • PORTRAITS DE L'ATMOSPHÈRE	
3.1 Une vue d'ensemble	81
3.2 L'atmosphère vue de profil	82
3.3 L'atmosphère d'un pôle à l'autre	84
3.3.1 Le bilan radiatif	85

3.3.2	La température	88
3.3.3	Le vent	93
3.3.4	La répartition de la masse atmosphérique	99
3.3.5	L'eau	104
3.3.6	Superpositions de champs moyens	105
3.3.7	Le couvercle de la troposphère : la tropopause	108
3.4	Zoom sur les régions tropicales	113
3.4.1	Le point sur la zone de convergence intertropicale	113
3.4.2	La mousson	114
3.4.3	Les cyclones tropicaux	118
3.4.4	Les organisations convectives et les circulations tropicales locales	120
3.5	Zoom sur les moyennes latitudes	125
3.5.1	La zone barocline moyenne	125
3.5.2	Les ondes quasi stationnaires	126
3.5.3	La variabilité basses fréquences, les régimes de temps	127
3.5.4	Variabilité synoptique : les perturbations baroclines	132
3.5.5	Le rail des dépressions	143
3.5.6	Les situations convectives	144
3.5.7	Les brouillards	147
3.5.8	Les influences locales : exemples de l'orographie et des côtes	149
CHAPITRE 4 • INTRODUCTION AU MODÈLE THÉORIQUE DE FLUIDE ATMOSPHÉRIQUE		
4.1	Rappels sur les trois lois fondamentales de la mécanique classique	155
4.2	Le modèle de fluide continu et la particule de fluide	157
4.2.1	Approche macroscopique	157
4.2.2	Définition de la particule de fluide	157
4.2.3	Approche eulérienne et approche lagrangienne	158
4.3	Description de l'atmosphère à l'échelle du continuum	160
4.3.1	Le déplacement et la vitesse macroscopiques	160
4.3.2	La pression et la température dans un gaz, équation d'état	162
4.3.3	Cas d'un mélange de gaz : la loi de Dalton	166
4.3.4	Fluide barotrope, fluide barocline	167
CHAPITRE 5 • LA LOI DE CONSERVATION DE LA MASSE		
5.1	Forme lagrangienne	169
5.2	Cas d'un fluide dit « incompressible »	170
5.3	Forme eulérienne	170
5.4	Équivalence des deux formes de la loi de conservation de la masse	171
CHAPITRE 6 • LA LOI DE CONSERVATION DE LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT		
6.1	Inventaire des forces	173
6.1.1	La force d'attraction terrestre	174
6.1.2	Les forces s'appliquant à la surface d'un petit élément de volume	174

6.2	Équation du mouvement absolu	180
6.3	La conservation de la quantité de mouvement dans un référentiel tournant	180
6.3.1	Évolution d'un vecteur dans un référentiel tournant	180
6.3.2	Vitesse absolue, vitesse relative	182
6.3.3	Accélération absolue, accélération relative	184
6.3.4	Forces d'inertie	185
6.4	La force de gravité en météorologie; définition de la verticale	187
6.5	L'équation du mouvement dans le repère local	189
6.6	L'énergie cinétique macroscopique, l'énergie potentielle et le géopotential	191
6.7	Cas particulier de l'atmosphère « au repos » dans le référentiel terrestre	193
CHAPITRE 7 • LA LOI DE CONSERVATION DE L'ÉNERGIE		
7.1	Le premier principe de la thermodynamique, équations pour la température	197
7.1.1	Définition de l'énergie interne	197
7.1.2	Le premier principe de la thermodynamique	199
7.2	Exemples de transformations thermodynamiques	203
7.2.1	Transformation isochore	203
7.2.2	Transformation isotherme	203
7.2.3	Transformation isobare	204
7.2.4	Transformation adiabatique	206
7.3	La température potentielle	207
7.3.1	Définition	207
7.3.2	Loi d'évolution	208
7.3.3	Ascendances et subsidences adiabatiques	209
7.3.4	La distribution verticale de la température potentielle dans l'atmosphère	211
7.4	Les diagrammes thermodynamiques	213
CHAPITRE 8 • LES ÉCHANGES DE CHALEUR AVEC L'EXTÉRIEUR		
8.1	Les échanges de chaleur par conduction	219
8.1.1	Loi de Fourier	219
8.1.2	Bilan des flux de conduction	221
8.2	Les échanges de chaleur par rayonnement électromagnétique	221
8.2.1	Généralités sur le rayonnement électromagnétique	222
8.2.2	Notion d'angle solide	224
8.2.3	Grandeurs énergétiques associées au rayonnement	225
8.2.4	Interaction entre le rayonnement et la matière	227
8.2.5	L'émission et l'absorption	228
8.2.6	Bilan radiatif à travers un élément de matière	232
8.2.7	Le rayonnement solaire	233
8.2.8	Le rayonnement atmosphérique et terrestre	235
8.2.9	Bilan des flux de rayonnement	238

CHAPITRE 9 • LES CHANGEMENTS D'ÉTAT DE L'EAU

9.1	L'évaporation et la condensation de l'eau	241
9.2	Les humidités	243
9.3	La vapeur sèche et la vapeur saturante	244
9.4	La chaleur latente de vaporisation	246
9.5	Chaleur latente et enthalpie	247
9.5.1	Changement d'état et équation d'évolution de l'enthalpie	247
9.5.2	Cas d'une transformation isotherme	248
9.5.3	Cas d'une transformation adiabatique	248
9.5.4	Évolution de la température potentielle et changement d'état	249
9.6	Les autres changements de phase	250
9.7	La sursaturation et la surfusion	252
9.8	Processus de saturation d'une particule d'air atmosphérique	253
9.9	Évolutions thermodynamiques d'une particule saturée et représentation sur l'émagramme	256

CHAPITRE 10 • LES LOIS SUR LES MOUVEMENTS DE ROTATION

10.1	Rappels sur la rotation solide	261
10.2	Le moment cinétique par rapport à l'axe de rotation de la Terre	264
10.2.1	Définition	264
10.2.2	Loi d'évolution	264
10.3	Le vecteur tourbillon	266
10.3.1	Définition	266
10.3.2	Vecteur tourbillon absolu	266
10.3.3	Vecteur tourbillon relatif	266
10.3.4	Lois d'évolution	267
10.4	Le tourbillon vertical	270
10.4.1	Définitions	270
10.4.2	Équation d'évolution	271
10.5	Le tourbillon potentiel	271

CHAPITRE 11 • INTRODUCTION À LA NOTION D'ORDRE DE GRANDEUR ET APPROXIMATIONS DE BASE

11.1	Retour sur la notion d'échelle, échelle de travail, échelle résolue	275
11.2	Notion d'analyse en ordre de grandeur	278
11.3	Atmosphère au repos, atmosphère de référence	279
11.4	L'approximation de la pellicule mince	280
11.5	L'approximation du plan tangent	281
11.5.1	Les équations en coordonnées cartésiennes	281
11.5.2	f -plan, β -plan	283

CHAPITRE 12 • L'ÉLASTICITÉ DANS UN FLUIDE, APPROXIMATION ANÉLASTIQUE, SYSTÈME DE BOUSSINESQ

12.1	L'élasticité de l'air	285
12.1.1	Définition	285

12.1.2	Le principe du filtrage de l'élasticité de l'air	286
12.2	L'approximation anélastique	287
12.2.1	L'équation anélastique	287
12.2.2	Interprétation de l'équation anélastique	288
12.2.3	Ordre de grandeur de la vitesse verticale	289
12.3	L'approximation de Boussinesq	290
12.3.1	Définition	290
12.3.2	Le système des équations de Boussinesq	291
CHAPITRE 13 • QUASI-ÉQUILIBRE VERTICAL, APPROXIMATION HYDROSTATIQUE		
13.1	Définition de l'approximation hydrostatique	295
13.2	Validité de l'approximation hydrostatique	296
13.3	Température et épaisseur entre deux isobares	298
13.4	L'approximation hydrostatique dans le système de Boussinesq	300
13.5	La coordonnée verticale pression	301
13.5.1	Définition	301
13.5.2	Passage de la coordonnée altitude à la coordonnée pression	301
13.5.3	D'autres coordonnées verticales	302
CHAPITRE 14 • LE QUASI-ÉQUILIBRE HORIZONTAL, LES ÉCOULEMENTS DE GRANDE ÉCHELLE ET L'APPROXIMATION QUASI-GÉOSTROPHIQUE		
14.1	Échelles et rotation de la Terre	305
14.2	La composante géostrophique de la circulation à grande échelle	307
14.2.1	Définition de l'équilibre géostrophique	307
14.2.2	Le vent géostrophique	308
14.2.3	Le tourbillon et la divergence du vent géostrophique	312
14.2.4	L'ordre de grandeur de la vitesse verticale de grande échelle	313
14.3	L'équilibre du vent thermique	314
14.3.1	Définition	314
14.3.2	Relation du vent thermique et baroclinie	315
14.3.3	Interprétation de la relation du vent thermique	316
14.4	Les équations à grande échelle	317
14.4.1	L'équation quasi-géostrophique du mouvement horizontal	317
14.4.2	L'équation de balance géostrophique	319
14.4.3	L'équation quasi-géostrophique du tourbillon	320
14.4.4	L'équation quasi-géostrophique de la thermodynamique	321
14.5	Le tourbillon potentiel à grande échelle et l'inversion du tourbillon potentiel	324
14.5.1	Le tourbillon potentiel quasi-géostrophique	324
14.5.2	Notion d'inversion du tourbillon potentiel	328
14.6	Modèle de troposphère à tourbillon potentiel uniforme	330
14.6.1	Localisation des extrema de perturbation de pression dans une troposphère à tourbillon potentiel uniforme	331
14.6.2	Zone cyclonique au sol	334

14.6.3	Zone cyclonique à la tropopause	335
14.6.4	Zones anticycloniques au sol ou à la tropopause	336
14.6.5	Influence de la taille de l'anomalie de température sur le tourbillon	336
14.7	Anomalies de tourbillon potentiel	338
14.7.1	Génération d'anomalies de tourbillon potentiel par une source de chaleur	338
14.7.2	Anomalies positive et négative de tourbillon potentiel à l'intérieur de la troposphère	339
14.8	Déformation de la tropopause et anomalies de tourbillon potentiel	341
14.9	Le vent agéostrophique et la vitesse verticale à grande échelle	342
14.9.1	Équation diagnostique quasi-géostrophique pour la vitesse verticale de grande échelle	343
14.9.2	Circulation secondaire associée à une zone barocline idéalisée	347
14.9.3	Circulation secondaire associée à une zone barocline idéalisée perturbée par une anomalie cyclonique au sol	349
14.9.4	Interprétation de la circulation secondaire de grande échelle en termes de tourbillon potentiel	352
14.9.5	Circulation secondaire associée à une zone barocline idéalisée perturbée par une anomalie cyclonique à la tropopause et cas d'anomalies anticycloniques	355
CHAPITRE 15 • EXEMPLES D'AJUSTEMENT DE L'ATMOSPHÈRE		
15.1	Ajustement hydrostatique à une source diabatique, cas sans rotation de la Terre	357
15.1.1	Ajustement à une source diabatique	358
15.1.2	Rétablissement de l'état de repos	362
15.2	Ajustement au géostrophisme	363
CHAPITRE 16 • ÉLÉMENTS DE DYNAMIQUE DES ÉCOULEMENTS DE PETITE ÉCHELLE		
16.1	Les mouvements verticaux contrôlés par la flottabilité	371
16.1.1	Flottabilité d'un solide à l'interface entre deux liquides	372
16.1.2	Flottabilité d'une particule d'air, modèle de la particule	376
16.1.3	Influence du contenu en eau sur la flottabilité	381
16.1.4	Flottabilité d'une particule saturée	383
16.1.5	Les limites du modèle de la particule, analyse de l'équation du mouvement vertical	384
16.2	La dynamique du tourbillon à mésoéchelle	387
16.2.1	Équations des composantes du tourbillon dans le système de Boussinesq	387
16.2.2	L'équilibre cyclostrophique	387
16.2.3	Relation avec la vitesse verticale	388
CHAPITRE 17 • LES ÉCOULEMENTS PRÈS DE LA SURFACE, TURBULENCE		
17.1	Écoulements au voisinage de la surface terrestre : définition de la couche limite atmosphérique	391
17.2	Écoulements laminaires et écoulements turbulents	393
17.3	Approche statistique de la turbulence	394
17.3.1	Définition des flux turbulents	394

17.3.2	Interprétation des flux turbulents	395
17.3.3	Hypothèses de fermeture	398
17.4	Intensité et origine de la turbulence	399
17.5	Les différents régimes de turbulence, nombre de Richardson	401
17.6	Modèle très simplifié de couche limite atmosphérique : la couche limite d'Ekman	402
17.7	Modèle simplifié pour la description du profil de vent dans la couche limite de surface	406
17.7.1	Définition, hypothèses	406
17.7.2	Profil de vent dans la couche limite de surface	407
17.7.3	Coefficients de frottement	408
CHAPITRE 18 • CIRCULATION GÉNÉRALE : LA MACHINE ATMOSPHÉRIQUE		
18.1	Transports d'énergie et mélange à l'échelle planétaire	414
18.1.1	Mode d'emploi pour la lecture des figures 18.2, 18.3 et 18.4	415
18.1.2	Analyse des figures 18.2 et 18.3	419
18.1.3	Analyse de la figure 18.4	419
18.1.4	Synthèse et enseignements concernant la circulation générale	419
18.2	Contraintes sur la circulation générale	420
18.2.1	Les grands équilibres	420
18.2.2	La conservation du moment cinétique	421
18.3	Modèles de la circulation générale	423
18.4	Synthèse énergétique de la circulation générale	428
18.4.1	L'atmosphère : moteur ou pompe à chaleur	429
18.4.2	Différents mécanismes de conversion du chauffage différentiel en mouvement	432
18.4.3	Bilan énergétique global du système Terre/atmosphère	434
CHAPITRE 19 • LES PERTURBATIONS BAROCLINES DES MOYENNES LATITUDES		
19.1	La zone barocline de grande échelle	437
19.1.1	Modèles de zone barocline de grande échelle	438
19.1.2	La zone barocline : résultat de l'ajustement géostrophique au chauffage différentiel	439
19.2	Perturbations quasi stationnaires d'une zone barocline de grande échelle	440
19.2.1	Modèle simple d'ondes de Rossby planétaires	441
19.2.2	Variabilité basses fréquences de la zone barocline de grande échelle	445
19.2.3	Rapides de jet d'échelle planétaire	447
19.3	Les perturbations baroclines	451
19.3.1	Ondes synoptiques se propageant le long d'une zone barocline à tourbillon potentiel uniforme	451
19.3.2	Le mécanisme de développement barocline	454
19.3.3	Dissymétrie entre l'amplification d'une anomalie de tourbillon positive et l'amplification d'une anomalie de tourbillon négative	458
19.3.4	Les perturbations baroclines dans la circulation générale : mélange méridien de chaleur	459
19.3.5	Influence de la condensation de l'eau	460
19.3.6	Scénarios de cyclogénèses baroclines	461

19.4	Les fronts	465
19.4.1	Déformation et renforcement local de la zone barocline	465
19.4.2	Convergence du vent agéostrophique et rétroaction sur la zone barocline	471
19.4.3	Boucle de rétroaction dans un front	473
19.4.4	Synthèse du mécanisme de frontogénèse	475
19.4.5	La grande diversité des fronts	477
19.5	L'aspect lagrangien des circulations dans une perturbation barocline, les nuages et les précipitations	478
19.5.1	Trajectoires dans une perturbation barocline idéalisée	479
19.5.2	Trajectoires dans une perturbation réelle	481
CHAPITRE 20 • LES PHÉNOMÈNES CONVECTIFS		
20.1	L'instabilité de flottabilité	486
20.1.1	Le niveau de convection libre	486
20.1.2	La CAPE	488
20.1.3	La CIN	490
20.1.4	Les courants subsidents, les courants de densité et le front de rafale	490
20.1.5	Modèle conceptuel de la cellule ordinaire	494
20.2	Notion de cisaillement vertical de vent et interaction avec le courant de densité	496
20.2.1	Cisaillement, hodographe et liens avec le tourbillon horizontal	496
20.2.2	Interaction entre courant de densité et cisaillement de basses couches	499
20.2.3	Modèle conceptuel d'orage multicellulaire	502
20.3	Cas de cisaillements profonds, unidirectionnels ou rotationnels et interactions avec les ascendances	504
20.3.1	Cas d'un cisaillement unidirectionnel et séparation en deux cellules	504
20.3.2	Interaction d'un cisaillement vertical avec une ascendance nuageuse	507
20.3.3	Cas d'un cisaillement rotationnel et renforcement d'une des cellules	509
20.3.4	Modèle conceptuel d'orage supercellulaire	511
20.3.5	Quel type d'orage pour quel environnement ?	513
20.4	Les systèmes convectifs de mésoéchelle	514
20.4.1	Modèle conceptuel de ligne de grains	517
20.5	L'activité électrique dans un nuage	521
20.5.1	Climatologie des éclairs	521
20.5.2	Processus d'électrification d'un nuage	522
20.5.3	Éclairs et tonnerre	523
20.5.4	Les éclairs et la prévision à très courte échéance	526
CHAPITRE 21 • LES PHÉNOMÈNES DE BASSES COUCHES		
21.1	Bilan énergétique à la surface	527
21.1.1	Les flux	528
21.1.2	Le bilan des flux	531

21.2	Évolution diurne de la couche limite atmosphérique	531
21.3	Masses d'air	534
21.4	Brumes et brouillards	534
21.4.1	Le brouillard de rayonnement	535
21.4.2	Le brouillard d'advection	535
21.5	Circulations de brise	536
21.5.1	La brise de mer et la brise de terre	536
21.5.2	Les brises de pente et les brises de vallée	539
21.6	Jet nocturne de basses couches	541
21.7	Modifications de l'écoulement synoptique par la topographie	544
21.7.1	Les écoulements perturbés par un obstacle	544
21.7.2	Les vents locaux et les vents régionaux	549
CHAPITRE 22 • LES MODÈLES DE PRÉVISION NUMÉRIQUE		
22.1	Le principe de la prévision numérique	556
22.1.1	La discrétisation de l'espace et du temps	556
22.1.2	Un problème « à la condition initiale »	557
22.1.3	Le cycle d'assimilation	558
22.2	Les rouages d'un modèle de prévision	560
22.2.1	De la condition initiale à la prévision	560
22.2.2	La dynamique	561
22.2.3	La physique	563
22.3	Le parc des modèles de prévision numérique	571
22.4	Les validations, les contrôles, les performances	574
CHAPITRE 23 • L'ASSIMILATION DES DONNÉES		
23.1	Le principe de l'assimilation des données	577
23.2	Les méthodes opérationnelles d'analyse	581
23.2.1	L'interpolation optimale	581
23.2.2	L'assimilation variationnelle 3D VAR	585
23.2.3	L'assimilation variationnelle 4D VAR	589
CHAPITRE 24 • LA PRÉVISION DU TEMPS		
24.1	De l'état du modèle aux cartes du prévisionniste	591
24.2	L'adaptation statistique locale de champs de modèle	593
24.3	Les limites de la prévision déterministe, vers des prévisions probabilistes	594
24.3.1	Prévision déterministe, prévision probabiliste	594
24.3.2	Échelles et prévisibilité	597
24.3.3	La prévision d'ensemble	598
24.4	Faire une prévision	601
ÉPILOGUE		605

XIV Fondamentaux de météorologie

ANNEXE A • CONSTANTES USUELLES	607
ANNEXE B • OUTILS MATHÉMATIQUES	609
ANNEXE C • OUTILS D'ANALYSE DE DONNÉES	643
ANNEXE D • NOTION D'ONDES	653
ANNEXE E • COMPLÉMENTS SUR LES ÉQUATIONS D'ÉVOLUTION DE L'ATMOSPHÈRE	661
ANNEXE F • LES ÉQUATIONS HYDROSTATIQUES EN COORDONNÉE PRESSION	667
ANNEXE G • ÉLÉMENTS D'ANALYSE NUMÉRIQUE	675
ANNEXE H • PRINCIPAUX SYMBOLES GRAPHIQUES POUR LA MÉTÉOROLOGIE SYNOPTIQUE	691
BIBLIOGRAPHIE	695
INDEX	703

CET **OUVRAGE** présente les bases techniques et scientifiques de la météorologie de ce début du XXI^e siècle. Il permet à des lecteurs intéressés par la météorologie et possédant une culture scientifique générale d'aborder les connaissances classiques dans le domaine de la physique de l'atmosphère exposées avec un souci pédagogique permanent.

Il présente également un état de l'art des principaux modèles conceptuels fondés sur des résultats de publications scientifiques récentes ainsi que les techniques actuelles d'observation et de prévision numérique du temps.

Dans la première partie, très descriptive, le lecteur découvre les différents moyens d'observation de l'atmosphère ainsi que les paramètres qui décrivent l'état de l'atmosphère, depuis l'échelle de la planète jusqu'à celle du nuage.

La deuxième partie expose les lois générales d'évolution du fluide atmosphérique.

Puis, dans la troisième partie sont expliquées les approximations classiques de ces lois générales pour différentes échelles spatio-temporelles.

La quatrième partie décrit les modèles conceptuels issus des progrès récents de la recherche météorologique.

Enfin, la dernière partie expose les principes généraux de la prévision numérique du temps, clé de voûte de la prévision météorologique actuelle.

Avec une approche qui combine rigueur théorique et interprétation physique, ce livre s'adresse à un public varié :

- étudiants en météorologie ;
- utilisateurs des informations météorologiques (marins, pilotes, vélivoles, etc.) désireux de comprendre en profondeur les mécanismes atmosphériques ;
- professeurs de physique et de « sciences de la vie et de la Terre », de l'enseignement secondaire et des classes préparatoires, qui choisissent la météorologie comme thème d'activités pédagogiques ;
- météorologistes professionnels.

Les connaissances scientifiques générales auxquelles il fait appel sont celles d'un premier cycle universitaire scientifique.

Sylvie Malardel a enseigné pendant 10 ans la dynamique de l'atmosphère à l'École Nationale de la Météorologie tout en continuant la recherche au Centre National de Recherches Météorologiques à Toulouse. Elle travaille maintenant plus spécifiquement sur la prévision numérique à moyenne échelle.

Chez le même éditeur

- Météorologie montgolfières
– *Carnet de vols*

Th. BEAUDENON

- La météorologie du pilote VFR
– *Savoir analyser et interpréter un dossier de vol*

J.-P. FIÉQUE

- La Météo du Vol à Voile et du Vol Libre - *Savoir analyser, interpréter la météo du jour et anticiper les bonnes journées de vol*

J.-P. FIÉQUE

- Navigation astronomique
– *Pratique du sextant*

H. Labatut, T. du Puy de Goyné

www.cepadues.com

Réf. 851

ISBN : 978.2.85428.851.3



9 782854 288513