

Fondamentaux de Météorologie

PROLOGUE

CHAPITRE 1 • INTRODUCTION À LA MÉTÉOROLOGIE

- 1.1 Il était une fois l'air
- 1.2 L'énergie du Soleil
- 1.3 Les phénomènes atmosphériques
 - 1.3.1 Échelles
 - 1.3.2 Perturbations et anomalies
 - 1.3.3 Interactions d'échelles
- 1.4 Cause ou effet ?
- 1.5 De l'observation à la prévision opérationnelle

CHAPITRE 2 • OBSERVATION DE L'ATMOSPHÈRE

- 2.1 Les principaux paramètres à observer
 - 2.1.1 La température de l'air
 - 2.1.2 La pression atmosphérique
 - 2.1.3 Le vent
 - 2.1.4 L'humidité de l'air
 - 2.1.5 Les précipitations
 - 2.1.6 Les nuages
 - 2.1.7 La visibilité, la brume et le brouillard
- 2.2 Les observations in situ
 - 2.2.1 Les moyens de mesure
 - 2.2.2 Les réseaux de mesure
 - 2.2.3 Les codes, le pointage et les cartes météorologiques
- 2.3 La télédétection
 - 2.3.1 Les satellites météorologiques
 - 2.3.2 Les radars météorologiques
 - 2.3.3 D'autres moyens de télédétection

CHAPITRE 3 • PORTRAITS DE L'ATMOSPHÈRE

- 3.1 Une vue d'ensemble
- 3.2 L'atmosphère vue de profil
- 3.3 L'atmosphère d'un pôle à l'autre
 - 3.3.1 Le bilan radiatif
 - 3.3.2 La température
 - 3.3.3 Le vent
 - 3.3.4 La répartition de la masse atmosphérique
 - 3.3.5 L'eau
 - 3.3.6 Superpositions de champs moyens
 - 3.3.7 Le couvercle de la troposphère : la tropopause
- 3.4 Zoom sur les régions tropicales
 - 3.4.1 Le point sur la zone de convergence intertropicale
 - 3.4.2 La mousson
 - 3.4.3 Les cyclones tropicaux
 - 3.4.4 Les organisations convectives et les circulations tropicales locales
- 3.5 Zoom sur les moyennes latitudes
 - 3.5.1 La zone barocline moyenne
 - 3.5.2 Les ondes quasi stationnaires

- 3.5.3 La variabilité basses fréquences, les régimes de temps
- 3.5.4 Variabilité synoptique : les perturbations baroclines
- 3.5.5 Le rail des dépressions
- 3.5.6 Les situations convectives
- 3.5.7 Les brouillards
- 3.5.8 Les influences locales : exemples de l'orographie et des côtes

CHAPITRE 4 • INTRODUCTION AU MODÈLE THÉORIQUE DE FLUIDE ATMOSPHERIQUE 4.1 Rappels sur les trois lois fondamentales de la mécanique classique

- 4.2 Le modèle de fluide continu et la particule de fluide
 - 4.2.1 Approche macroscopique
 - 4.2.2 Définition de la particule de fluide
 - 4.2.3 Approche eulérienne et approche lagrangienne
- 4.3 Description de l'atmosphère à l'échelle du continuum
 - 4.3.1 Le déplacement et la vitesse macroscopiques
 - 4.3.2 La pression et la température dans un gaz, équation d'état
 - 4.3.3 Cas d'un mélange de gaz : la loi de Dalton
 - 4.3.4 Fluide barotrope, fluide barocline

CHAPITRE 5 • LA LOI DE CONSERVATION DE LA MASSE

- 5.1 Forme lagrangienne
- 5.2 Cas d'un fluide dit « incompressible »
- 5.3 Forme eulérienne
- 5.4 Équivalence des deux formes de la loi de conservation de la masse

CHAPITRE 6 • LA LOI DE CONSERVATION DE LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT

- 6.1 Inventaire des forces
 - 6.1.1 La force d'attraction terrestre
 - 6.1.2 Les forces s'appliquant à la surface d'un petit élément de volume
- 6.2 Équation du mouvement absolu
- 6.3 La conservation de la quantité de mouvement dans un référentiel tournant
 - 6.3.1 Évolution d'un vecteur dans un référentiel tournant
 - 6.3.2 Vitesse absolue, vitesse relative
 - 6.3.3 Accélération absolue, accélération relative
 - 6.3.4 Forces d'inertie
- 6.4 La force de gravité en météorologie ; définition de la verticale
- 6.5 L'équation du mouvement dans le repère local
- 6.6 L'énergie cinétique macroscopique, l'énergie potentielle et le géopotentiel
- 6.7 Cas particulier de l'atmosphère « au repos » dans le référentiel terrestre

CHAPITRE 7 • LA LOI DE CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

- 7.1 Le premier principe de la thermodynamique, équations pour la température
 - 7.1.1 Définition de l'énergie interne
 - 7.1.2 Le premier principe de la thermodynamique
- 7.2 Exemples de transformations thermodynamiques
 - 7.2.1 Transformation isochore
 - 7.2.2 Transformation isotherme
 - 7.2.3 Transformation isobare
 - 7.2.4 Transformation adiabatique
- 7.3 La température potentielle
 - 7.3.1 Définition

- 7.3.2 Loi d'évolution
- 7.3.3 Ascendances et subsidences adiabatiques
- 7.3.4 La distribution verticale de la température potentielle dans l'atmosphère
- 7.4 Les diagrammes thermodynamiques

CHAPITRE 8 • LES ÉCHANGES DE CHALEUR AVEC L'EXTÉRIEUR

- 8.1 Les échanges de chaleur par conduction
 - 8.1.1 Loi de Fourier
 - 8.1.2 Bilan des flux de conduction
- 8.2 Les échanges de chaleur par rayonnement électromagnétique
 - 8.2.1 Généralités sur le rayonnement électromagnétique
 - 8.2.2 Notion d'angle solide
 - 8.2.3 Grandeurs énergétiques associées au rayonnement
 - 8.2.4 Interaction entre le rayonnement et la matière
 - 8.2.5 L'émission et l'absorption
 - 8.2.6 Bilan radiatif à travers un élément de matière
 - 8.2.7 Le rayonnement solaire
 - 8.2.8 Le rayonnement atmosphérique et terrestre
 - 8.2.9 Bilan des flux de rayonnement

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

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

CHAPITRE 10 • LES LOIS SUR LES MOUVEMENTS DE ROTATION

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

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
- 11.2 Notion d'analyse en ordre de grandeur
- 11.3 Atmosphère au repos, atmosphère de référence
- 11.4 L'approximation de la pellicule mince
- 11.5 L'approximation du plan tangent
 - 11.5.1 Les équations en coordonnées cartésiennes
 - 11.5.2 f-plan, b-plan

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

- 12.1 L'élasticité de l'air
 - 12.1.1 Définition
 - 12.1.2 Le principe du filtrage de l'élasticité de l'air
- 12.2 L'approximation anélastique
 - 12.2.1 L'équation anélastique
 - 12.2.2 Interprétation de l'équation anélastique
 - 12.2.3 Ordre de grandeur de la vitesse verticale
- 12.3 L'approximation de Boussinesq
 - 12.3.1 Définition
 - 12.3.2 Le système des équations de Boussinesq

CHAPITRE 13 • QUASI-ÉQUILIBRE VERTICAL, APPROXIMATION HYDROSTATIQUE 13.1 Définition de l'approximation hydrostatique

- 13.2 Validité de l'approximation hydrostatique
- 13.3 Température et épaisseur entre deux isobares
- 13.4 L'approximation hydrostatique dans le système de Boussinesq
- 13.5 La coordonnée verticale pression
 - 13.5.1 Définition
 - 13.5.2 Passage de la coordonnée altitude à la coordonnée pression
 - 13.5.3 D'autres coordonnées verticales

CHAPITRE 14 • LE QUASI-ÉQUILIBRE HORIZONTAL, LES ÉCOULEMENTS DE GRANDE ÉCHELLE ET L'APPROXIMATION QUASI-GÉOSTROPHIQUE

- 14.1 Échelles et rotation de la Terre
- 14.2 La composante géostrophique de la circulation à grande échelle
 - 14.2.1 Définition de l'équilibre géostrophique
 - 14.2.2 Le vent géostrophique
 - 14.2.3 Le tourbillon et la divergence du vent géostrophique
 - 14.2.4 L'ordre de grandeur de la vitesse verticale de grande échelle
- 14.3 L'équilibre du vent thermique
 - 14.3.1 Définition
 - 14.3.2 Relation du vent thermique et baroclinie
 - 14.3.3 Interprétation de la relation du vent thermique
- 14.4 Les équations à grande échelle
 - 14.4.1 L'équation quasi-géostrophique du mouvement horizontal
 - 14.4.2 L'équation de balance géostrophique
 - 14.4.3 L'équation quasi-géostrophique du tourbillon
 - 14.4.4 L'équation quasi-géostrophique de la thermodynamique
- 14.5 Le tourbillon potentiel à grande échelle et l'inversion du tourbillon potentiel
 - 14.5.1 Le tourbillon potentiel quasi-géostrophique
 - 14.5.2 Notion d'inversion du tourbillon potentiel
- 14.6 Modèle de troposphère à tourbillon potentiel uniforme

- 14.6.1 Localisation des extrema de perturbation de pression dans une troposphère à tourbillon potentiel uniforme
- 14.6.2 Zone cyclonique au sol
- 14.6.3 Zone cyclonique à la tropopause
- 14.6.4 Zones anticycloniques au sol ou à la tropopause
- 14.6.5 Influence de la taille de l'anomalie de température sur le tourbillon
- 14.7 Anomalies de tourbillon potentiel
 - 14.7.1 Génération d'anomalies de tourbillon potentiel par une source de chaleur
 - 14.7.2 Anomalies positive et négative de tourbillon potentiel à l'intérieur de la troposphère
- 14.8 Déformation de la tropopause et anomalies de tourbillon potentiel
- 14.9 Le vent agéostrophique et la vitesse verticale à grande échelle
 - 14.9.1 Équation diagnostique quasi-géostrophique pour la vitesse verticale de grande échelle
 - 14.9.2 Circulation secondaire associée à une zone barocline idéalisée
 - 14.9.3 Circulation secondaire associée à une zone barocline idéalisée perturbée par une anomalie cyclonique au sol
 - 14.9.4 Interprétation de la circulation secondaire de grande échelle en termes de tourbillon potentiel
 - 14.9.5 Circulation secondaire associée à une zone barocline idéalisée perturbée par une anomalie cyclonique à la tropopause et cas d'anomalies anticycloniques

CHAPITRE 15 • EXEMPLES D'AJUSTEMENT DE L'ATMOSPHÈRE

- 15.1 Ajustement hydrostatique à une source diabatique, cas sans rotation de la Terre
 - 15.1.1 Ajustement à une source diabatique
 - 15.1.2 Rétablissement de l'état de repos
- 15.2 Ajustement au géostrophisme

CHAPITRE 16 • ÉLÉMENTS DE DYNAMIQUE DES ÉCOULEMENTS DE PETITE ÉCHELLE 16.1 Les mouvements verticaux contrôlés par la flottabilité

- 16.1.1 Flottabilité d'un solide à l'interface entre deux liquides
- 16.1.2 Flottabilité d'une particule d'air, modèle de la particule
- 16.1.3 Influence du contenu en eau sur la flottabilité
- 16.1.4 Flottabilité d'une particule saturée
- 16.1.5 Les limites du modèle de la particule, analyse de l'équation du mouvement vertical
- 16.2 La dynamique du tourbillon à mésoéchelle
 - 16.2.1 Équations des composantes du tourbillon dans le système de Boussinesq
 - 16.2.2 L'équilibre cyclostrophique
 - 16.2.3 Relation avec la vitesse verticale

CHAPITRE 17 • LES ÉCOULEMENTS PRÈS DE LA SURFACE, TURBULENCE

- 17.1 Écoulements au voisinage de la surface terrestre : définition de la couche limite atmosphérique
- 17.2 Écoulements laminaires et écoulements turbulents
- 17.3 Approche statistique de la turbulence
 - 17.3.1 Définition des flux turbulents
 - 17.3.2 Interprétation des flux turbulents
 - 17.3.3 Hypothèses de fermeture
- 17.4 Intensité et origine de la turbulence
- 17.5 Les différents régimes de turbulence, nombre de Richardson
- 17.6 Modèle très simplifié de couche limite atmosphérique : la couche limite d'Ekman
- 17.7 Modèle simplifié pour la description du profil de vent dans la couche limite de surface
 - 17.7.1 Définition, hypothèses
 - 17.7.2 Profil de vent dans la couche limite de surface
 - 17.7.3 Coefficients de frottement

CHAPITRE 18 • CIRCULATION GÉNÉRALE : LA MACHINE ATMOSPHERIQUE

18.1 Transports d'énergie et mélange à l'échelle planétaire

18.1.1 Mode d'emploi pour la lecture des figures

18.2, 18.3 et 18.4

18.1.2 Analyse des figures 18.2 et 18.3

18.1.3 Analyse de la figure 18.4

18.1.4 Synthèse et enseignements concernant la circulation générale

18.2 Contraintes sur la circulation générale

18.2.1 Les grands équilibres

18.2.2 La conservation du moment cinétique

18.3 Modèles de la circulation générale

18.4 Synthèse énergétique de la circulation générale

18.4.1 L'atmosphère : moteur ou pompe à chaleur

18.4.2 Différents mécanismes de conversion du chauffage différentiel en mouvement

18.4.3 Bilan énergétique global du système Terre/atmosphère

CHAPITRE 19 • LES PERTURBATIONS BAROCLINES DES MOYENNES LATITUDES

19.1 La zone barocline de grande échelle

19.1.1 Modèles de zone barocline de grande échelle

19.1.2 La zone barocline : résultat de l'ajustement géostrophique au chauffage différentiel

19.2 Perturbations quasi stationnaires d'une zone barocline de grande échelle

19.2.1 Modèle simple d'ondes de Rossby planétaires

19.2.2 Variabilité basses fréquences de la zone barocline de grande échelle

19.2.3 Rapides de jet d'échelle planétaire

19.3 Les perturbations baroclines

19.3.1 Ondes synoptiques se propageant le long d'une zone barocline à tourbillon potentiel uniforme

19.3.2 Le mécanisme de développement barocline

19.3.3 Dissymétrie entre l'amplification d'une anomalie de tourbillon positive et l'amplification d'une anomalie de tourbillon négative

19.3.4 Les perturbations baroclines dans la circulation générale : mélange méridien de chaleur

19.3.5 Influence de la condensation de l'eau

19.3.6 Scénarios de cyclogénèses baroclines

19.4 Les fronts

19.4.1 Déformation et renforcement local de la zone barocline

19.4.2 Convergence du vent agéostrophique et rétroaction sur la zone barocline

19.4.3 Boucle de rétroaction dans un front

19.4.4 Synthèse du mécanisme de frontogénèse

19.4.5 La grande diversité des fronts

19.5 L'aspect lagrangien des circulations dans une perturbation barocline, les nuages et les précipitations

19.5.1 Trajectoires dans une perturbation barocline idéalisée

19.5.2 Trajectoires dans une perturbation réelle

CHAPITRE 20 • LES PHÉNOMÈNES CONVECTIFS

20.1 L'instabilité de flottabilité

20.1.1 Le niveau de convection libre

20.1.2 La CAPE

20.1.3 La CIN

20.1.4 Les courants subsidents, les courants de densité et le front de rafale

20.1.5 Modèle conceptuel de la cellule ordinaire

20.2 Notion de cisaillement vertical de vent et interaction avec le courant de densité

20.2.1 Cisaillement, hodographe et liens avec le tourbillon horizontal

- 20.2.2 Interaction entre courant de densité et cisaillement de basses couches
- 20.2.3 Modèle conceptuel d'orage multicellulaire
- 20.3 Cas de cisaillements profonds, unidirectionnels ou rotationnels et interactions avec les ascendances
 - 20.3.1 Cas d'un cisaillement unidirectionnel et séparation en deux cellules
 - 20.3.2 Interaction d'un cisaillement vertical avec une ascendance nuageuse
 - 20.3.3 Cas d'un cisaillement rotationnel et renforcement d'une des cellules
 - 20.3.4 Modèle conceptuel d'orage supercellulaire
 - 20.3.5 Quel type d'orage pour quel environnement ?
- 20.4 Les systèmes convectifs de mésoéchelle
 - 20.4.1 Modèle conceptuel de ligne de grains
- 20.5 L'activité électrique dans un nuage
 - 20.5.1 Climatologie des éclairs
 - 20.5.2 Processus d'électrification d'un nuage
 - 20.5.3 Éclairs et tonnerre
 - 20.5.4 Les éclairs et la prévision à très courte échéance

CHAPITRE 21 • LES PHÉNOMÈNES DE BASSES COUCHES

- 21.1 Bilan énergétique à la surface
 - 21.1.1 Les flux
 - 21.1.2 Le bilan des flux
- 21.2 Évolution diurne de la couche limite atmosphérique
- 21.3 Masses d'air
- 21.4 Brumes et brouillards
 - 21.4.1 Le brouillard de rayonnement
 - 21.4.2 Le brouillard d'advection
- 21.5 Circulations de brise
 - 21.5.1 La brise de mer et la brise de terre
 - 21.5.2 Les brises de pente et les brises de vallée
- 21.6 Jet nocturne de basses couches
- 21.7 Modifications de l'écoulement synoptique par la topographie
 - 21.7.1 Les écoulements perturbés par un obstacle
 - 21.7.2 Les vents locaux et les vents régionaux

CHAPITRE 22 • LES MODÈLES DE PRÉVISION NUMÉRIQUE

- 22.1 Le principe de la prévision numérique
 - 22.1.1 La discrétisation de l'espace et du temps
 - 22.1.2 Un problème « à la condition initiale »
 - 22.1.3 Le cycle d'assimilation
- 22.2 Les rouages d'un modèle de prévision
 - 22.2.1 De la condition initiale à la prévision
 - 22.2.2 La dynamique
 - 22.2.3 La physique
- 22.3 Le parc des modèles de prévision numérique
- 22.4 Les validations, les contrôles, les performances

CHAPITRE 23 • L'ASSIMILATION DES DONNÉES

- 23.1 Le principe de l'assimilation des données
- 23.2 Les méthodes opérationnelles d'analyse
 - 23.2.1 L'interpolation optimale
 - 23.2.2 L'assimilation variationnelle 3D VAR
 - 23.2.3 L'assimilation variationnelle 4D VAR

CHAPITRE 24 • LA PRÉVISION DU TEMPS

24.1 De l'état du modèle aux cartes du prévisionniste

24.2 L'adaptation statistique locale de champs de modèle

24.3 Les limites de la prévision déterministe, vers des prévisions probabilistes

24.3.1 Prévision déterministe, prévision probabiliste

24.3.2 Échelles et prévisibilité

24.3.3 La prévision d'ensemble

24.4 Faire une prévision

ÉPILOGUE

ANNEXE A • CONSTANTES USUELLES

ANNEXE B • OUTILS MATHÉMATIQUES

ANNEXE C • OUTILS D'ANALYSE DE DONNÉES

ANNEXE D • NOTION D'ONDES

ANNEXE E • COMPLÉMENTS SUR LES ÉQUATIONS D'ÉVOLUTION DE L'ATMOSPHÈRE

ANNEXE F • LES ÉQUATIONS HYDROSTATIQUES EN COORDONNÉE PRESSION

ANNEXE G • ÉLÉMENTS D'ANALYSE NUMÉRIQUE

ANNEXE H • PRINCIPAUX SYMBOLES GRAPHIQUES POUR LA MÉTÉOROLOGIE SYNOPTIQUE

BIBLIOGRAPHIE

INDEX