

Sommaire

CHAPITRE I UN DEMI-SIÈCLE DE PRÉVISION NUMÉRIQUE

I.1 - Introduction	1
I.2 - Le temps des défricheurs	1
I.3 - Un demi-siècle de progrès continus	3
I.3.1 - La nécessité d'allier précision et rapidité	3
I.3.2 - L'utilisation des équations filtrées	4
I.3.3 - Le retour aux équations primitives et l'initialisation	5
I.3.4 - Le traitement planétaire et la méthode spectrale	5
I.3.5 - L'utilisation des modèles sur domaine limité	6
I.3.6 - Les algorithmes permettant l'augmentation du pas de temps	7
I.3.7 - Le passage aux équations non hydrostatiques	7
I.3.8 - La prise en compte des processus physiques	7
I.3.9 - L'analyse objective et l'assimilation des données	8
I.4 - Évolution générale de l'outil de travail	8
I.4.1 - La puissance de calcul accompagne les progrès	9
I.4.2 - De l'ENIAC aux grands ordinateurs scientifiques	9
I.4.3 - Les machines vectorielles mono et multiprocesseurs	10
I.4.4 - Les ordinateurs massivement parallèles	10
I.4.5 - Les évolutions du logiciel	11

CHAPITRE II LES DIVERSES FORMES DES ÉQUATIONS

II.1 - Introduction	13
II.2 - Les diverses simplifications et les modèles correspondants	13
II.2.1 - Les équations sous leur forme générale	13
II.2.2 - Approximation traditionnelle et équations non hydrostatiques	14
II.2.3 - L'hypothèse hydrostatique et les équations primitives	15
II.2.4 - Formulation des équations primitives en coordonnée pression	16
II.2.5 - Les équations du modèle « en eau peu profonde »	18
II.2.6 - Les équations du modèle « à divergence nulle »	19
II.3 - Représentation dans divers systèmes de coordonnées	19
II.3.1 - Les opérateurs vectoriels en coordonnées curvilignes	19
II.3.2 - Les coordonnées géographiques naturelles	20
II.3.3 - L'écriture des équations en projection conforme	22
II.4 - Étude de quelques projections conformes particulières	23
II.4.1 - La projection stéréographique polaire	23
II.4.2 - La projection de Mercator	25
II.4.3 - La projection de Lambert	26
II.4.4 - La transformation conforme de la sphère sur elle-même	27

CHAPITRE III L'UTILISATION DES DIFFÉRENCES FINIES

III.1 - Introduction	31
III.2 - La méthode des différences finies	31
III.2.1 - Principe de calcul, ordre de précision	31
III.2.2 - Les notations courantes pour les différences finies	32
III.2.3 - La précision des schémas aux différences finies	35
III.3 - Les grilles utilisées et leurs propriétés	37
III.3.1 - Les équations primitives en projection conforme	37
III.3.2 - Écriture en grille A	38
III.3.3 - Écriture en grille B	39
III.3.4 - Écriture en grille C	39
III.3.5 - Écriture en grille D' oscillante (dite d'Eliassen)	40
III.3.6 - Les propriétés des diverses grilles	41
III.3.7 - Le filtrage spatial	43
III.4 - Conclusion	44

CHAPITRE IV LES MÉTHODES SPECTRALES

IV.1 - Introduction	45
IV.2 - L'utilisation de développements en série de fonctions	45
IV.2.1 - Généralités sur les méthodes de Galerkin	45
IV.2.2 - Utilisation des éléments finis pour l'équation d'advection	46
IV.3 - La méthode spectrale sur la sphère	48
IV.3.1 - Généralités	48
IV.3.2 - La base des harmoniques sphériques superficielles	48
IV.3.3 - Propriétés des harmoniques sphériques	50
IV.3.4 - Développement d'un champ sphérique	51
IV.3.5 - La troncature du développement	52
IV.3.6 - Calcul des termes linéaires et application au calcul du vent	53
IV.3.7 - Le calcul des termes non linéaires	54
IV.3.8 - Mise en œuvre pratique de la méthode spectrale	57
IV.4 - La méthode spectrale sur un domaine bipériodique	58
IV.4.1 - La construction d'un domaine bipériodique	58
IV.4.2 - Les fonctions de base	58
IV.4.3 - La troncature elliptique	60
IV.4.4 - Le calcul des termes linéaires	61
IV.4.5 - Le calcul des termes non linéaires	61
IV.4.6 - Intérêt de la méthode	62

CHAPITRE V LES EFFETS DE LA NUMÉRISATION

V.1 - Introduction	63
V.2 - Le modèle barotrope linéarisé	63
V.2.1 - Les équations pour les perturbations	63
V.2.2 - Les solutions analytiques du modèle linéarisé	64
V.3 - Effet de la discrétisation horizontale	66
V.3.1 - Principe général	66
V.3.2 - Application aux diverses grilles	66
V.4 - Étude de divers schémas d'intégration temporelle	69
V.4.1 - Le schéma explicite d'Euler	70
V.4.2 - Le schéma explicite centré	71
V.4.3 - Le schéma semi-implicite centré	74
V.4.4 - Le schéma semi-lagrangien semi-implicite centré	76
V.5 - Le filtrage temporel	82

V.6 - Effet de la discrétisation spatiale sur la condition de stabilité	84
V.6.1 - Cas des modèles en différences finies	84
V.6.2 - Cas des modèles spectraux.....	85

CHAPITRE VI LES MODÈLES BAROTROPES

VI.1 - Les modèles barotropes fondés sur l'évolution du tourbillon	87
VI.1.1 - Le modèle à divergence nulle	87
VI.1.2 - Introduction d'un terme de divergence moyenne	88
VI.1.3 - L'instabilité non linéaire et sa prévention	89
VI.2 - Le modèle barotrope en eau peu profonde	93
VI.2.1 - Les propriétés du modèle en eau peu profonde.....	93
VI.2.2 - Les équations discrétisées sur une grille C	94
VI.2.3 - Le schéma explicite centré.....	97
VI.2.4 - Le schéma semi-implicite centré	98
VI.2.5 - Les schémas semi-lagrangiens	99
VI.3 - Le traitement spectral du modèle en eau peu profonde	104
VI.3.1 - Formulation des équations.....	104
VI.3.2 - Le traitement semi-implicite	106
VI.3.3 - Le traitement semi-lagrangien	107
VI.4 - Utilisation pratique du modèle barotrope en eau peu profonde.....	110

CHAPITRE VII LES ÉQUATIONS D'UN MODÈLE BAROCLINE

VII.1 - Introduction	111
VII.2 - Introduction d'une coordonnée verticale générale	111
VII.2.1 - Les formules de transformation.....	111
VII.2.2 - L'expression de la dérivée totale	112
VII.3 - Application aux équations primitives	112
VII.3.1 - L'équation de l'hydrostatique	112
VII.3.2 - Le terme de force de pression.....	112
VII.3.3 - L'équation de continuité.....	112
VII.3.4 - L'équation de tendance de la pression de surface	113
VII.3.5 - L'équation pour la vitesse verticale	114
VII.4 - Diverses coordonnées verticales pour les équations primitives.....	114
VII.4.1 - Les inconvénients de la coordonnée pression	114
VII.4.2 - La coordonnée sigma.....	114
VII.4.3 - La coordonnée hybride progressive	115
VII.5 - La généralisation au cas des équations non hydrostatiques	119
VII.5.1 - Le rôle de la « pression hydrostatique ».....	119
VII.5.2 - La coordonnée hybride « pression hydrostatique » normalisée	119
VII.5.3 - Une formulation globale synthétique des équations.....	121
VII.6 - Les propriétés conservatives des équations	123
VII.6.1 - L'expression des paramètres globaux.....	123
VII.6.2 - La conservation de la masse	124
VII.6.3 - La conservation du moment cinétique	124
VII.6.4 - La conservation de l'énergie	125
VII.7 - Conclusion	126

CHAPITRE VIII QUELQUES MODÈLES BAROCLINES

VIII.1 - Introduction	127
VIII.2 - Le contexte de la discrétisation	127
VIII.2.1 - Les équations	127
VIII.2.2 - Les couches, les niveaux et la position des variables	128

VIII.3 - La discrétisation verticale des équations	129
VIII.3.1 - Les advections verticales	129
VIII.3.2 - Équation d'évolution de la pression de surface	130
VIII.3.3 - Équation diagnostique pour la vitesse verticale généralisée	130
VIII.3.4 - Équation diagnostique pour le géopotential	130
VIII.3.5 - Expression de la force de pression	131
VIII.3.6 - Terme de conversion d'énergie	131
VIII.3.7 - Place des niveaux de pression	133
VIII.3.8 - Solutions alternatives pour la discrétisation verticale	134
VIII.4 - Un modèle en coordonnée sigma et différences finies sur grille C	135
VIII.4.1 - Simplifications avec la coordonnée sigma pure	135
VIII.4.2 - La position des variables sur la grille C	135
VIII.4.3 - Les équations discrétisées	136
VIII.4.4 - L'intégration du modèle de façon explicite	139
VIII.4.5 - Mise en œuvre de l'intégration temporelle semi-implicite	141
VIII.5 - Formalisation de la méthode semi-implicite	145
VIII.5.1 - Écriture générale de l'algorithme	145
VIII.5.2 - Interprétation de la méthode semi-implicite	145
VIII.6 - Modèle spectral à résolution variable en coordonnée hybride ...	147
VIII.6.1 - Les équations de base	147
VIII.6.2 - L'intégration du modèle de façon explicite	148
VIII.6.3 - Mise en œuvre de l'intégration temporelle semi-implicite	151
VIII.7 - Le traitement lagrangien de l'advection dans les modèles baroclines ...	153

CHAPITRE IX LES PARAMÉTRISATIONS PHYSIQUES

IX.1 - Introduction	155
IX.2 - Les équations relatives à une atmosphère humide multiphasique ..	156
IX.2.1 - Cadre schématique des interactions entre les constituants	157
IX.2.2 - Les équations sous forme conservative	158
IX.3 - Le rayonnement	160
IX.3.1 - Généralités	160
IX.3.2 - Prise en compte des effets du rayonnement dans l'atmosphère	161
IX.3.3 - L'approximation des deux flux et l'intégration sur une couche	161
IX.3.4 - Le calcul des épaisseurs optiques et l'intégration spectrale	163
IX.3.5 - L'intégration sur les chemins optiques et le calcul des flux	165
IX.3.6 - Le traitement des nuages	166
IX.4 - La couche limite et la diffusion	170
IX.4.1 - Généralités	170
IX.4.2 - La paramétrisation des flux turbulents en surface	171
IX.4.3 - Les flux dans la couche limite planétaire	173
IX.4.4 - La prise en compte de la convection peu profonde	175
IX.4.5 - L'évolution des paramètres de surface	175
IX.4.6 - Prise en compte des flux, diffusion verticale	178
IX.5 - Les précipitations résolues à l'échelle de la maille	180
IX.5.1 - Généralités	180
IX.5.2 - Le calcul des précipitations dans une couche d'atmosphère	180
IX.5.3 - L'évaporation des précipitations	181
IX.5.4 - La fonte de la neige en cours de chute	182
IX.5.5 - Le processus de calcul dans les diverses couches	183
IX.5.6 - La nécessité de schémas plus détaillés	184
IX.6 - La convection	185
IX.6.1 - Généralités	185
IX.6.2 - Le problème de la causalité pour la convection	185
IX.6.3 - Les équations de base pour le schéma	186
IX.6.4 - Les profils caractéristiques du nuage et la microphysique	188

IX.6.5 - Le déclenchement de l'instabilité	188
IX.6.6 - La relation de fermeture	188
IX.6.7 - Perspectives	189
IX.7 - L'effet de l'orographie sur le flux à grande échelle	189
IX.7.1 - Le flux de quantité de mouvement induit par le relief	189
IX.7.2 - Effets de résonance et de piégeage de l'onde	190
IX.7.3 - Conséquences du blocage partiel du flux	191
IX.8 - La diffusion horizontale	192
IX.9 - La validation des paramétrisations physiques	193

CHAPITRE X LA PRÉVISION OPÉRATIONNELLE

X.1 - Introduction	195
X.2 - Les observations météorologiques	195
X.2.1 - Le Système mondial d'observations	195
X.2.2 - Les observations in situ	196
X.2.3 - Les observations télédéteçtées	196
X.3 - L'analyse objective et l'assimilation de données	197
X.3.1 - Introduction	197
X.3.2 - La méthode des corrections successives	198
X.3.3 - L'approche statistique et la modélisation des erreurs	199
X.3.4 - L'interpolation statistique par l'approche des moindres carrés	199
X.3.5 - L'interpolation optimale	200
X.3.6 - La méthode variationnelle 3D	201
X.3.7 - La variante incrémentale	202
X.3.8 - L'assimilation variationnelle 4D	203
X.3.9 - Le filtre de Kalman	204
X.4 - L'initialisation des données au démarrage du modèle	206
X.4.1 - Les premières tentatives d'initialisation	206
X.4.2 - Le principe de l'utilisation des modes normaux	206
X.4.3 - L'initialisation intégrée à l'assimilation de données	209
X.5 - Les modèles couplés	209
X.5.1 - Les modèles sur domaine limité	209
X.5.2 - Le traitement classique des conditions aux limites latérales	210
X.5.3 - Le principe des modèles emboîtés	210
X.5.4 - L'utilisation d'un domaine à maille variable	212
X.6 - Le post-traitement des données prévues par les modèles	212
X.6.1 - Le problème du relief	212
X.6.2 - Les diverses interpolations	212
X.7 - La prévision locale	213
X.7.1 - Le principe de l'adaptation statistique	213
X.7.2 - La méthode de la prévision parfaite	214
X.7.3 - La méthode de statistique des sorties de modèle	214
X.7.4 - La méthode de correction à l'aide du filtre de Kalman	214
X.8 - La chaîne de prévision numérique	215
X.8.1 - Les divers maillons de la chaîne	215
X.8.2 - L'importance du « temps de coupure »	215
X.8.3 - La chaîne de prévision et la chaîne d'assimilation	216
X.9 - La vérification des prévisions	216
X.9.1 - Les définitions de base	216
X.9.2 - Quelques scores classiques de vérification	217
X.9.3 - La vérification des événements catégorisés	219
X.10 - La prévision d'ensemble	220
X.10.1 - La limite de prévisibilité	220
X.10.2 - L'utilisation d'un ensemble	221
X.10.3 - La présentation des résultats	222

X.11 - La coopération internationale	223
X.12 - Les perspectives pour l'avenir	224
X.12.1 - La puissance des ordinateurs ne cesse d'augmenter	224
X.12.2 - L'assimilation de données	224
X.12.3 - Les modèles de prévision	225
X.12.4 - Les modèles d'application spécialisés	225
X.12.5 - La simulation	225
X.12.6 - La prévision d'ensemble	226
X.12.7 - Conclusion	226
BIBLIOGRAPHIE	229
LISTE DES SYMBOLES PRINCIPAUX	245
INDEX	251