

Les écoulements turbulents

modélisation et simulation

2^e édition revue et augmentée

Roland Schiestel

HERMES

Les écoulements turbulents

modélisation et simulation

2^e édition revue et augmentée

Roland Schiestel



HERMES

Table des matières

Préface de Brian E. Launder	13
Préface, traduction française	17
Avant-propos	21
Introduction	25
Chapitre 1. Introduction à la modélisation de la turbulence.	
Concepts de base	31
1.1. Nature de la turbulence	31
1.2. Les différentes approches de la turbulence	34
1.3. La turbulence homogène et isotrope (T.H.I.)	41
1.4. Hypothèses de Kolmogoroff et théorie de l'isotropie locale	54
1.5. Fermetures en un point	62
1.6. Description fonctionnelle de la turbulence	70
1.7. Turbulence bidimensionnelle	72
Chapitre 2. Equations de transport de la turbulence en fluide	
incompressible	75
2.1. Equations de transport de la dynamique	77
2.2. Equations de transport de la turbulence associée à un scalaire	
passif	80

Chapitre 3. Outils mathématiques	83
3.1. Tenseurs	83
3.2. Espace euclidien en coordonnées curvilignes	85
3.3. Coordonnées curvilignes orthogonales	87
3.4. Transformation conforme	91
3.5. Invariants	93
3.6. Représentation des fonctions tensorielles	98
3.7. Transformation de Fourier dans le champ des fluctuations	103
Chapitre 4. Méthodologie pour les fermetures en un point	107
4.1. Estimation de l'ordre de grandeur des termes dans les équations du transport turbulent	108
4.2. Application aux équations de $\bar{U}_i$, k et ϵ	110
4.3. Formulation des hypothèses de fermeture	112
4.4. Le modelage invariant de Lumley	112
4.5. Exemples d'application	116
4.6. Problèmes de réalisabilité	119
4.7. Les corrélations diffusives	134
4.8. Intermittence	136
Chapitre 5. La turbulence homogène anisotrope (T.H.A.)	137
5.1. L'équation de Craya	137
5.2. Propriétés spectrales unidimensionnelles en écoulement turbulent cisailé homogène	141
5.3. Partie rapide des corrélations de pression dans la distorsion brusque d'une turbulence isotrope	142
5.4. Modèles spectraux	144
5.5. Turbulence associée à un scalaire passif	145
5.6. Equations des corrélations en un point en T.H.A.	146
5.7. Exemples d'écoulements turbulents homogènes anisotropes	147
5.8. Distorsion rapide d'un fluide turbulent homogène	153
5.9. Compléments sur les solutions linéaires	157
Chapitre 6. Modélisation des équations d'évolution des tensions de Reynolds	159
6.1. Les équations aux tensions de Reynolds et leur trace	159
6.2. Modélisation des termes de dissipation visqueuse	163

6.3. Modélisation des termes de diffusion turbulente	164
6.4. Corrélations pression-déformation	167
6.5. Détermination des constantes numériques	179

Chapitre 7. Echelles de turbulence et nouvelles orientations

en modélisation au second ordre	185
7.1. L'équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique de la turbulence	186
7.2. Modélisation des termes de diffusion	188
7.3. Modélisation des termes sources et puits	189
7.4. Détermination des constantes numériques	193
7.5. Les volumes tensoriels	195
7.6. Retour sur l'équation de ε	197
7.7. Nouvelles orientations de recherche en modélisation au deuxième ordre	199

Chapitre 8. Modélisation des équations d'évolution des flux turbulents d'un scalaire passif

8.1. Les équations d'évolution des flux turbulents d'un scalaire passif ..	211
8.2. Ordre de grandeur des termes	212
8.3. Modélisation des termes dissipatifs	213
8.4. Modélisation des termes de diffusion turbulente	214
8.5. Modélisation des corrélations pression-gradient du scalaire passif ..	215
8.6. Détermination des constantes numériques	219
8.7. Modélisations de nouvelle génération	223

Chapitre 9. La variance d'un scalaire passif et son taux de dissipation

9.1. Equation d'évolution de la variance d'un scalaire passif	225
9.2. Modélisation des termes de diffusion turbulente	226
9.3. Modélisation du taux de dissipation	227
9.4. L'équation du taux de dissipation de la variance d'un scalaire passif	227
9.5. Nouvelles orientations de recherche	230

Chapitre 10. Fermetures simplifiées : modèles à deux et à trois équations de transport	231
10.1. Modèle $k-R_{12}-\epsilon$ pour les écoulements turbulents en couche mince cisailée	231
10.2. Modèles à deux équations	233
10.3. Modelage algébrique des tensions de Reynolds et des flux turbulents d'un scalaire passif	239
10.4. Modèles non-linéaires	242
10.5. Modèles algébriques explicites	245
Chapitre 11. Fermetures simplifiées : modèles à zéro et à une équation de transport	247
11.1. Modèles à une équation	248
11.2. Modèles à zéro équation	251
Chapitre 12. Traitement de la turbulence à faible nombre de Reynolds	257
12.1. Equations aux tensions de Reynolds	257
12.2. Equation du taux de dissipation	259
12.3. Modèle $k-R_{12}-\epsilon$ pour les écoulements de paroi	261
12.4. Modification des flux dans une turbulence à faible intensité	262
12.5. Modèles d'ordre inférieur	264
12.6. Modélisations de deuxième génération	270
Chapitre 13. Le traitement des parois : méthodes et problèmes	279
13.1. L'écoulement turbulent près d'une paroi	279
13.2. Fonctions de paroi	281
13.3. Modèles simples pour la sous-couche visqueuse	288
13.4. Modèles à plusieurs équations pour la sous-couche visqueuse	292
Chapitre 14. Influence des forces d'Archimède	295
14.1. Equations de transport de la turbulence dans l'approximation de Boussinesq	295
14.2. Influence des termes de gravité sur les corrélations pression-déformation	298

14.3. Influence des termes de gravité sur les corrélations pression- gradient de température	300
14.4. Influence des termes de gravité sur les échelles de turbulence ou le taux de dissipation	301
14.5. Ecoulements bidimensionnels horizontaux en présence de forces d'Archimède	302
14.6. Modelage algébrique	303
14.7. Modèles simplifiés	305
14.8. Modèles de nouvelle génération	307

Chapitre 15. Remarques sur les problèmes posés par l'étude

d'écoulements complexes	309
15.1. L'effet de courbure	310
15.2. Mouvements secondaires	314
15.3. Effet de la rotation	316
15.4. Exemples d'écoulements turbulents complexes qui mettent en défaut les fermetures classiques en un point	317
15.5. Compléments sur les équations de Navier-Stokes en repère relatif	318
15.6. Turbulence en rotation en présence d'effets thermiques	323
15.7. Structures cohérentes et modélisation	324

Chapitre 16. Ecoulements turbulents à masse volumique

variable	325
16.1. Les moyennes	326
16.2. Les équations de transport	327
16.3. Modélisation des équations aux tensions de Reynolds dans le formalisme des moyennes pondérées par la masse	332
16.4. Equation du taux de dissipation	334
16.5. Equations aux flux de chaleur turbulents	334
16.6. Equation de la variance des fluctuations de température	335
16.7. Modèles à deux équations et modèles simplifiés	336
16.8. Approche en variables non pondérées	337
16.9. Continuité	338
16.10. Equations statistiques et modélisation	339
16.11. Equation du taux de dissipation	341
16.12. Autres approches	342

Chapitre 17. Modèles à échelles multiples	345
A. Approche intuitive	348
17A.1. Le concept monoéchelle	348
17A.2. Le concept multiéchelles	349
17A.3. Comment utiliser les échelles multiples ?	351
17A.4. Premières applications à des écoulements turbulents simples	353
17A.5. Premières applications aux écoulements libres turbulents	353
B. Fondements de la méthode	354
17B.1. Décomposition en rangs multiples	354
17B.2. Equations de la dynamique spectrale	356
17B.3. Equations de transport des tensions de Reynolds partielles	361
17B.4. Les corrélations de pression	365
17B.5. Le problème de fermeture	366
17B.6. La partition en nombres d'onde	369
17B.7. Les équations aux flux spectraux	369
C. Formulations pratiques et extensions	371
17C.1. Modèle multiéchelle aux tensions de Reynolds à M niveaux et pour les forts nombres de Reynolds de turbulence	371
17C.2. Expression des flux spectraux	377
17C.3. Obtention pratique des nombres d'onde de coupure	378
17C.4. Modèle aux énergies partielles MKFM	379
17C.5. Modèle aux énergies partielles RS-MKFM	380
17C.6. Modèle à faible nombre de Reynolds MRFLM	381
17C.7. Modèle à faible nombre de Reynolds MKFLM	384
17C.8. Modèle à faible nombre de Reynolds RS-MKFLM	386
17C.9. Note sur l'extension aux écoulements turbulents à masse volumique variable	387
Chapitre 18. Simulations numériques des grandes structures turbulentes	389
18.1. Les filtres	391
18.2. Les équations de Navier-Stokes filtrées	393
18.3. Les modélisations de sous-maille	398
18.4. Quelques remarques sur les méthodes numériques	404
18.5. Simulation d'écoulements homogènes	405

18.6. Simulation d'écoulements inhomogènes sur paroi	406
18.7. Le défiltrage	409
18.8. Filtres variables	410
18.9. Nouvelles directions de recherche, problèmes ouverts	410
Chapitre 19. Synopsis sur les méthodes numériques	419
Bibliographie	455
Nomenclatures principales	499
Index	503

Cet ouvrage fournit les éléments fondamentaux pour développer les modélisations sur des bases rationnelles. Les différentes méthodes d'approche y sont abordées, depuis les modélisations statistiques à leurs divers niveaux de complexité jusqu'aux simulations numériques de turbulence. Ces diverses méthodes ont chacune leurs performances et leurs limitations spécifiques, elles apparaissent ainsi plus complémentaires que compétitives.

Après une présentation des concepts de base, des outils mathématiques et des méthodes de fermeture, l'ouvrage aborde les modèles de fermeture au deuxième ordre. Cette dernière approche est privilégiée car elle présente les potentialités pour clarifier de nombreux problèmes dans les écoulements turbulents cisailés. Les modèles simples plus anciens sont alors présentés comme des versions simplifiées des précédents. L'influence de paramètres physiques supplémentaires est ensuite considérée : effet du nombre de Reynolds de la turbulence, effet des parois, effet des forces de gravité, effets de courbure et de rotation, effet des variations de la masse volumique, effet du déséquilibre spectral. Enfin, la dernière partie est consacrée aux méthodes de simulation de grandes structures turbulentes amenées à prendre une extension considérable dans les problèmes qui exigent une description fine des interactions tourbillonnaires.

Les écoulements turbulents, 2^e édition revue et augmentée, est le fruit d'un enseignement en DEA de mécanique des fluides. Il s'adresse aussi bien aux étudiants de troisième cycle des universités et aux élèves-ingénieurs, qu'aux ingénieurs confrontés aux problèmes de turbulence en milieu fluide et aux chercheurs de disciplines connexes devant prendre en compte les effets de la turbulence. Les développements mathématiques des premiers chapitres, nécessaires à une présentation logique et cohérente, pourront cependant être provisoirement omis par un lecteur s'intéressant à la mise en œuvre pratique des modèles. La tâche lui sera facilitée par un ensemble de planches récapitulatives sur les techniques numériques pour l'implémentation informatique.

L'auteur

Roland Schiestel est docteur ès sciences physiques et ingénieur ENSEM. Directeur de recherche au CNRS, il exerce actuellement à l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre à Marseille.

Editions HERMES

8, quai du Marché-Neuf
75004 Paris



9 782866 016814