

TABLE DES MATIÈRES

Préface	ix
Remerciements	xiii
Introduction	xv
Sommaire	xvii

PARTIE I : LE PHÉNOMÈNE ET SA MISE EN ÉQUATIONS 1

1 DONNÉES PREMIÈRES SUR LES ÉCOULEMENTS TURBULENTS	3
1 La turbulence en mécanique des fluides	3
2 La caractéristique majeure du régime turbulent	4
2.1 Observations	4
2.2 Mesures	5
3 Traits distinctifs de l'agitation turbulente	7
3.1 Taille supra-moléculaire	7
3.2 Comportement aléatoire	8
3.3 Dénombrement infini	9
3.4 Structure tridimensionnelle	11
3.5 Intermittence	12
3.6 Cinématique rotationnelle	13
3.7 Dynamique non linéaire	13
3.8 Énergétique dissipative	14
4 Proposition de définition	14
5 Conséquences théoriques de l'état de turbulence du mouvement d'un fluide	15
5.1 Validité du modèle de Navier-Stokes	15
5.2 Déterminisme et turbulence	15
5.3 Prédétermination des écoulements turbulents	16
5.4 Statistique macroscopique et turbulence	17
6 Effets pratiques de la turbulence	19
6.1 Brassage par mouvement continu	19
6.2 Dispersion	20
6.3 Diffusion	21
6.4 Mélange	24
6.5 Transferts pariétaux	25
6.6 Dissipation	28

2	TRAITEMENT STATISTIQUE MACROSCOPIQUE DE LA TURBULENCE	31
1	Introduction	31
2	Les concepts fondamentaux	32
2.1	Univers des réalisations d'un écoulement turbulent	32
2.2	Élément aléatoire	32
3	Fonction – Variable aléatoire	33
3.1	Définitions	33
3.2	Différents types de fonctions aléatoires	34
4	Lois de probabilité	35
4.1	Fonction de répartition et densité de probabilité	35
4.2	Loi et densité de probabilité à l'ordre un d'une f.a.	36
5	Moyennes, moments, corrélations	37
5.1	Moyenne	37
5.2	Moment	37
5.3	Variance – Ecart type	37
5.4	Facteurs de dissymétrie et d'aplatissement	38
5.5	Fonction génératrice des moments	40
5.6	Fonction génératrice des cumulants	41
5.7	Covariance, coefficient de corrélation	42
5.8	Indépendance statistique - Moyennes conditionnelles	43
6	Décomposition harmonique et analyse spectrale	43
6.1	Décomposition harmonique d'une fonction certaine non périodique	43
6.2	Analyse harmonique de la fonction d'autocorrélation	44
6.3	Décomposition harmonique d'une fonction aléatoire	45
6.4	Propriétés énergétiques des f.a.	45
6.4.1	Localisation en fréquence – Densité spectrale d'énergie	45
6.4.2	Le théorème de Kintchine	46
7	Éléments de description statistique de la turbulence	47
7.1	Commutativité des opérateurs de moyenne et de dérivation	48
7.2	Les différents types de moyennes	48
7.2.1	Moyenne d'ensemble	48
7.2.2	Moyennes conditionnelles	49
7.2.3	Moyenne temporelle	50
7.2.4	Moyenne spatiale	50
7.2.5	Moyenne spatiale filtrée	50
7.3	Paramétrisation statistique de l'agitation	53
7.3.1	Intensités de turbulence	53
7.3.2	Échelles énergétiques	54
7.3.3	Micro et macro échelles de Taylor	55
7.3.4	Nombres de Reynolds de turbulence	57
7.3.5	Corrélations spatio-temporelles et célérité de transfert	58
7.4	Stationnarité et homogénéité	60

7.5	Ergodicité	61
7.5.1	Le théorème ergodique pour la moyenne	61
7.5.2	Conséquence pratique	62
7.6	Représentations en " transformées" temps-échelle	63
7.7	Théorème de la limite centrale et tendance gaussienne en turbulence	65
7.7.1	Le Théorème de la limite centrale de Laplace-Liapounov	65
7.7.2	Limite gaussienne des déplacements Lagrangiens	67
3	LES ÉQUATIONS GÉNÉRALES DE LA STATISTIQUE EN UN POINT	69
1	Introduction	69
2	Bases de l'étude	70
2.1	Les équations de départ	70
2.2	La décomposition statistique binaire	70
2.3	Les deux types d'advection	71
2.4	La diffusion turbulente	71
3	L'évolution moyenne	72
4	Les équations du mouvement moyen	73
4.1	Continuité du mouvement moyen	73
4.2	Dynamique du mouvement moyen : équations de REYNOLDS	74
5	Les équations aux corrélations de fluctuations de vitesse	80
5.1	Exposé du problème	80
5.2	Equation de transport de la fonction génératrice des moments aux fluctuations de vitesse	80
5.3	Bilan des tensions de Reynolds	84
5.3.1	Équations de transport des tensions de Reynolds	84
5.3.2	Tenseurs de dissipation	84
5.3.4	Tenseur d'anisotropie	86
6	Propriétés énergétiques	92
6.1	Définitions	92
6.2	Bilan instantané d'énergie cinétique	93
6.3	Bilan d'énergie cinétique du mouvement moyen	93
6.4	Bilan d'énergie cinétique du mouvement d'agitation	98
6.5	L'échange "interne" d'énergie	100
6.6	Taux de dissipation par agitation turbulente	101
6.7	Récapitulation	102
7	Les équations aux pressions	103
7.1	Pression instantanée	103
7.2	Pressions moyenne et fluctuante	104
8	Rotationnel et enstrophie	105
8.1	Définitions	105
8.2	Retour sur le caractère rotationnel du mouvement d'un fluide réel	107

8.3	Rappels	108
8.3.1	L'équation du rotationnel	108
8.3.2	L'interaction entre champ de vitesse et champ de rotationnel	109
8.3.3	L'équation de l'enstrophie	110
8.3.4	Variation d'enstrophie et étirement tourbillonnaire	110
8.4	L'équation du rotationnel moyen	112
8.5	L'équation de l'enstrophie du mouvement moyen	114
8.6	L'équation de l'enstrophie du mouvement d'agitation	115
8.7	Récapitulation	116
9	Taux de dissipation turbulente	118
9.1	Relation entre dissipation et pseudo-dissipation	118
9.2	L'équation de la pseudo-dissipation	119
9.3	L'équation de la dissipation	121
4	ANALYSE CORRÉLATOIRE EN DEUX POINTS	123
1	Introduction	123
2	L'approche corrélatoire	124
2.1	L'outil mathématique	124
2.1.1	Corrélations doubles de vitesse en deux points	124
2.1.2	Corrélations triples de vitesse en deux points	125
2.1.3	Corrélations mixtes pression-vitesse en deux points	125
2.1.4	Corrélations doubles particulières en deux points	126
2.1.5	Tenseurs des corrélations	126
2.1.6	Premières propriétés du tenseur des corrélations doubles	127
2.2	Dynamique des corrélations doubles	127
3	Théorie des corrélations en T.H.I.	130
3.1	Champ de turbulence homogène	130
3.2	Champ de turbulence isotrope	132
3.3	Tenseurs de corrélations doubles de vitesse en T.H.I.	133
3.3.1	Forme générique des tenseurs de corrélation en T.H.I.	133
3.3.2	Fonctions conventionnelles de corrélation en T.H.I.	134
3.3.3	Équivalence entre expressions des corrélations de vitesse en deux points	136
3.4	Tenseur de corrélations doubles de rotationnel	136
3.5	T.H.I. isovolume : Relations de Kármán et Howarth	137
3.5.1	L'hypothèse d'incompressibilité et ses conséquences	137
3.5.2	Corrélation pression-vitesse en fluide incompressible	138
3.5.3	Corrélations doubles de vitesses en fluide incompressible	138
3.5.4	Corrélations triples de vitesses en fluide incompressible	139
3.5.5	Les relations de Kármán et Howarth	140
3.5.6	Bilan de la description corrélatoire en T.H.I. isovolume	141

3.6	Études aux limites : Échelles conventionnelles	142
3.6.1	Comportement à l'origine des corrélations doubles	142
3.6.2	Comportement à l'origine des corrélations triples	143
3.6.3	Micro-échelle de Taylor	144
3.6.4	Macro-échelle de Taylor	144
3.7	Dynamique des corrélations en deux points	146
3.7.1	Équation d'évolution des corrélations en deux points	146
3.7.2	L'interprétation de l'équation de Kármán et Howarth	146
3.7.3	Propriétés aux "moments" : Invariant de Loitsyanski	147
3.7.4	Les restrictions locales de l'équation de Kármán et Howarth	148
3.8	Solutions modèles de l'équation de Howarth et Kármán	150
3.8.1	Le modèle linéaire	150
3.8.2	Propriétés remarquables des solutions du modèle linéaire	151
3.8.3	Solution générale d'affinité	152
3.8.4	Solution d'affinité restreinte	153
4	Expressions locales de la dissipation et de l'enstrophie en T.H.I.	155
4.1	Expression des corrélations aux dérivées de fluctuations de vitesse	156
4.2	Expression de l'enstrophie en T.H.I.	157
4.3	Expressions de la dissipation en T.H.I.	157
5	ÉLÉMENTS DE L'APPROCHE SPECTRALE	161
1	Introduction	161
2	Champ à périodicité spatiale et transformée de Fourier discrète	162
2.1	Champ spatial sinusoïdal. Vecteur d'onde	162
2.2	Représentation harmonique en série de Fourier de champs à périodicité spatiale	165
2.3	Simulation numérique directe par méthodes spectrales et pseudo-spectrales	168
3	Les équations de Navier-Stokes dans l'espace de Fourier	169
3.1	Transformées de Fourier temporelle et spatiale	169
3.2	Règles opératoires	170
3.3	Forme spectrale des équations de Navier-Stokes en turbulence homogène	171
4	Analyse spectrale de la T.H.I.	174
4.1	Tenseur spectral en T.H.I.	175
4.1.1	Définition	175
4.1.2	Propriétés	175
4.2	Spectre d'énergie en module en T.H.I.	177
4.3	Spectres monodimensionnels	179
4.3.1	Notions premières	179
4.3.2	Définitions générales	180

4.3.3	Relations intégrales entre spectre en module et spectres monodimensionnels en T.H.I.	187
4.3.4	Relation différentielle entre spectre en module et spectre monodimensionnel en T.H.I.	187
4.3.5	Équivalent spectral de la première relation de Kármán et Howarth	187
4.4	Caractéristiques spectrales en T.H.I. isovolume	187
4.5	Équations d'évolution des spectres en T.H.I.	187
4.5.1	L'équation d'évolution du tenseur spectral tridimensionnel	187
4.5.2	L'équation d'évolution du spectre en module	188
4.5.3	Remarques sur les équations de la dynamique spectrale	188
5	Expressions spectrales de la dissipation en T.H.I.	189

PARTIE II : DONNÉES SUR LA TURBULENCE EN FLUIDE INCOMPRESSIBLE 193

6	CLASSIFICATION ET ÉCOULEMENTS TURBULENTS TYPES	195
1	Introduction	195
2	Classification des écoulements turbulents isovolumes	196
2.1	But de la classification	196
2.2	Le mode de classification	196
2.3	Les critères de classement	198
2.3.1	Homogénéité spatiale	198
2.3.2	Échelles temporelles	198
2.3.3	Écoulements homogènes	199
2.3.4	Propriétés spatiales en écoulements inhomogènes	200
2.4	Les situations typiques du classement	201
3	Turbulence cinématiquement homogène	202
3.1	Définitions	202
3.1.1	Homogénéité et isotropie au sens de Taylor	202
3.1.2	Homogénéité au sens de Craya	203
3.1.3	Homogénéité et isotropie au sens de Lesieur	203
3.2	Propriétés physiques remarquables	204
3.3	Le problème d'évolution	204
3.4	La hiérarchie des écoulements homogènes	206
4	Écoulements cisailés simples de turbulence libre	207
4.1	Retour sur la situation en régime laminaire	208
4.1.1	Caractères spécifiques de la situation de type couche limite	208
4.1.2	L'hypothèse fondamentale en écoulement libre	208
4.2	Turbulence libre de type couche limite	209
4.2.1	L'équilibre temporel Advection / Diffusion	209
4.2.2	Échelles du bilan moyen de quantité de mouvement	210

4.2.3	Taux d'expansion	213
4.2.4	Échelles du bilan d'énergie cinétique d'agitation	214
4.2.5	Équations locales des écoulements turbulents libres de couche limite	217
5	Écoulements pariétaux cisailés simples	219
5.1	Les configurations typiques	219
5.2	Couche limite turbulente sur paroi lisse	219
5.3	L'analyse multi-échelles	221
5.3.1	Échelles de vitesses	221
5.3.2	Échelles de longueur	221
5.3.3	Le partitionnement à grand nombre de Reynolds	222
5.4	Les expressions du profil de vitesse moyenne	223
5.4.1	Lignes directrices de la démarche	223
5.4.2	Les échelles temporelles par zones	223
5.4.3	Loi linéaire en sous-couche visqueuse	224
5.4.4	Profil logarithmique en région interne	224
5.4.5	Loi de vitesse déficitaire en région externe	225
5.4.6	Récapitulation	226
5.5	Les équations locales de couche limite	228
5.6	Écoulement en canal et conduit	229
5.6.1	Échelles caractéristiques	229
5.6.2	Bilan moyen de quantité de mouvement	230
5.6.3	Profil de vitesse moyenne	231
7	PHÉNOMÉNOLOGIE TOURBILLONNAIRE, STRUCTURES COHÉRENTES ET PROPRIÉTÉS ÉNERGÉTIQUES	233
1	Introduction	233
2	Le modèle tourbillonnaire statistique	235
2.1	Définition et échelles caractéristiques	235
2.2	Paramétrisation des classes inertielles et visqueuses	236
3	Propriétés physiques du modèle tourbillonnaire statistique	238
3.1	Croissance des lignes fluides matérielles	238
3.1.1	Analyse simplifiée	238
3.1.2	L'évidence expérimentale	239
3.2	Croissance d'enstrophie par déformation élongationnelle isovolume	240
3.3	L'étirement tourbillonnaire	241
3.3.1	Analyse en termes d'échelles	242
3.3.2	Phénoménologie de la réaction en chaîne	243
3.4	Phénoménologie des structures dissipatives	245
3.4.1	La limitation par effet visqueux	245
3.4.2	Modèles physiques de structures dissipatives	245
4	Transfert énergétique selon le modèle statistique d'agitation turbulente . . .	246

5	Structure et cohérence en turbulence	249
6	Cohérence statistique	251
6.1	Différenciation statistique entre structures de l'agitation turbulente	251
6.2	Cohérence statistique	252
6.3	Limitations de l'approche structurale probabiliste	253
7	Cohérence physique à grande échelle	254
7.1	Tourbillon rectiligne à noyau visqueux	255
7.2	Structure tourbillonnaire cohérente	257
7.3	Mécanismes élémentaires d'interaction tourbillonnaire	259
7.4	Exemple de structures cohérentes en écoulement turbulent	261
7.5	Structures cohérentes en couche limite sur paroi plane	261
7.6	Structures cohérentes en zone de mélange	264
7.7	Structures cohérentes en sillage	266
7.8	Organisation tourbillonnaire en turbulence homogène cisillée	267
8	Agitation bimodale et transfert d'énergie	268
8.1	Agitation bimodale	268
8.2	Formulation de la décomposition	269
8.3	Équations moyennes	270
8.4	Équations aux énergies d'agitation	270
8.5	Schéma énergétique de l'agitation bimodale	271
8	LA TURBULENCE CINÉMATIQUEMENT HOMOGENÈE	275
1	Introduction	275
2	La turbulence homogène et isotrope	276
2.1	Le modèle de turbulence de grille	276
2.1.1	Description physique	276
2.1.2	L'approximation expérimentale	277
2.1.3	Universalité du modèle expérimental	278
2.1.4	L'approximation des conditions d'homogénéité et d'isotropie	278
2.2	État gaussien des fluctuations en turbulence de grille	279
2.3	Propriétés énergétiques	280
2.4	Décroissance énergétique	281
2.4.1	Les différentes phases	281
2.4.2	La phase initiale	283
2.4.3	La phase finale	286
2.5	Le reconditionnement spectral	288
2.5.1	La phase initiale	289
2.5.2	La phase finale	290
2.6	Les hypothèses de Kolmogorov sur les transferts d'énergie à grand nombre de Reynolds	291
2.6.1	Les données de départ	291

2.6.3	Échelles de Kolmogorov et normalisation spectrale	293
2.6.4	Seconde hypothèse de Kolmogorov	298
2.6.5	Constante de Kolmogorov	300
3	Dégénérescence de turbulence non isotrope	301
3.1	L'équation d'évolution des tensions de Reynolds	301
3.2	Les résultats principaux	302
3.2.1	Le retour à l'isotropie	302
3.2.2	Temps de retour à l'isotropie	304
4	Turbulence homogène cisailée	307
4.1	La configuration d'écoulement	307
4.2	Les résultats sur les tensions de Reynolds	307
4.3	Discussion des propriétés au second ordre	310
4.4	Échelles de longueur	312
5	Turbulence homogène en déformation pure plane	313
5.1	Action d'une déformation plane sur une turbulence homogène	313
5.1.1	La configuration expérimentale	313
5.1.2	Effet sur la décroissance énergétique	315
5.1.3	Effet sur l'anisotropie des tensions normales	316
5.1.4	Discussion des propriétés au second ordre	317
5.2	Action de deux déformations planes successives	318
5.2.1	Effet d'orientation sur l'anisotropie.	319
5.2.2	Production négative de turbulence	319
6	Turbulence homogène en rotation	320
6.1	La configuration expérimentale	320
6.2	Les effets de la rotation	321
6.2.1	Décroissance énergétique	321
6.2.2	Renforcement de l'anisotropie	322
6.2.3	Échelles intégrales	323
6.3	Discussion des propriétés au second ordre	324
9	TURBULENCE EN ÉCOULEMENT CISAILLÉ LIBRE	327
1	Introduction	327
2	Similitude de Reynolds	328
3	Affinité	330
3.1	Notion d'affinité de profils	330
3.2	Établissement des profils en affinité	330
3.3	Épaisseur de diffusion transversale	331
3.4	Échelle de vitesse normative de l'affinité	332
4	Comportement asymptotique des évolutions axiales	333
4.1	Taux d'expansion	333
4.2	Vitesse axiale de référence en jet libre et sillage	334
4.3	Intensité de turbulence et niveau énergétique	336

5 Profils d'affinité en turbulence libre	338
5.1 Vitesse moyenne	338
5.1.1 Vitesse axiale des jets, sillage et zone de mélange	338
5.1.2 Vitesse radiale et entraînement des jets	340
5.2 Tensions de Reynolds	342
5.2.1 Tensions normales	342
5.2.2 Cisaillement turbulent	345
6 Bilans énergétiques en turbulence libre	347
7 Données statistiques comparatives	351
7.1 Échelles temporelles du champ moyen	351
7.1.1 Échelle de cisaillement	351
7.1.2 Échelle d'advection	352
7.2 Échelles de longueur de la turbulence	353
7.2.1 Macro-échelles	353
7.2.2 Micro-échelles	354
7.3 Anisotropie des tensions de Reynolds	355
8 Frontière en turbulence libre	356
8.1 Intermittence de frontière	356
8.2 Géométrie de l'interface	358
9 Production négative	359
10 TURBULENCE EN ÉCOULEMENTS AVEC PAROIS	361
1 Introduction	361
2 Spécificités de la turbulence de paroi	361
2.1 Cisaillement pariétal	362
2.2 Effet de viscosité	363
2.3 Blocage cinématique	365
2.4 Réflexion des fluctuations de pression	366
3 Analyse asymptotique au voisinage de la paroi	369
4 Couche limite sur plaque plane	372
4.1 Profil de vitesse moyenne	372
4.2 Coefficient de frottement	376
4.3 Tensions de Reynolds	378
4.3.1 Frottement turbulent	378
4.3.2 Contraintes normales	380
4.4 Bilan énergétique	381
4.5 Bilans des tensions de Reynolds	384
4.6 Frontière libre	387
4.6.1 Intermittence de frontière	387
4.6.2 Épaisseurs conventionnelles	388
4.6.3 Sur-couche visqueuse	389

4	Aperçu sur les théories spectrales	427
4.1	Introduction au problème de fermeture dans l'espace spectral	427
4.2	Fermetures "phénoménologiques"	427
4.2.1	L'équation de départ	427
4.2.2	Quelques fermetures historiques	427
4.3	Fermetures aux moments spectraux	427
4.3.1	Exposé du problème	427
4.3.2	L'hypothèse quasi-normale (Q.N.)	427
4.3.3	L'hypothèse quasi-normale avec amortissement tourbillonnaire (E.D.Q.N.)	427
4.3.4	L'hypothèse quasi-normale avec amortissement tourbillonnaire markovianisé (E.D.Q.N.M.)	427
4.4	Fermetures selon Kraichnan	427
5	Aperçu sur la simulation des grandes échelles	436
5.1	Principe	436
5.2	Moyenne spatiale filtrée et fluctuation de sous-maille	436
5.3	Les équations aux moyennes spatiales filtrées	438
5.4	Aperçu des schémas de fermeture L.E.S.	438
6	Remarques finales	439
12	MODÈLES AU PREMIER ORDRE	441
1	Introduction	441
2	Rappel du problème	442
3	Le concept de viscosité de turbulence	442
3.1	Définition	442
3.2	Expression	443
3.3	Limitation physique	444
4	Les fermetures algébriques	445
4.1	Les approches phénoménologiques à longueur de mélange	445
4.1.1	Théorie de Prandtl (1925)	445
4.1.2	Théorie de Karman – Betz (1930)	450
4.1.3	Théorie de Taylor (1932)	451
4.2	Autres propositions	452
4.2.1	Extensions locales de schémas gradient	452
4.2.2	Expressions non locales	453
4.2.3	Schémas de type gradient / convection	454
5	Fermetures à équations de transport	459
5.1	L'hypothèse de grand nombre de Reynolds de turbulence	459
5.2	Conséquence sur la diffusion	459
5.3	Conséquence sur la dissipation	460
6	Modèles à une équation	460
6.1	Le schéma de Prandtl – Kolmogorov	460

6.2	Équation modèle d'énergie cinétique de turbulence	461
6.2.1	Les données du problème	461
6.2.2	Schéma de Production	461
6.2.3	Schéma de diffusion turbulente	461
6.2.4	Schéma de dissipation	462
6.2.5	Calage des constantes	462
6.2.6	Récapitulation du modèle à une équation (k)	463
6.3	Autres modèles à une équation	464
6.3.1	Modèle de Bradshaw, Ferriss et Atwell	464
6.3.2	Modèle de Nee et Kovaszny	464
6.4	Bilan des fermetures à une équation	464
7	Modèles à deux équations	465
7.1	Généralités	465
7.2	Le modèle $(\bar{k}, \bar{\varepsilon})$	466
7.2.1	Le schéma de viscosité	466
7.2.2	Équation modèle d'énergie	467
7.2.3	Équation modèle de la dissipation	467
7.2.4	Récapitulation du modèle à deux équations $(\bar{k}, \bar{\varepsilon})$	468
7.3	Autres modèles à deux équations	469
7.4	Calage des constantes	472
7.4.1	Le calage conventionnel	472
7.4.2	Le calage par techniques de renormalisation	474
7.5	Comportement en frontière libre	474
7.5.1	Modèles avec intermittence	474
7.5.2	Modèles sans intermittence	476
8	Fermetures non linéaires	476
8.1	Retour sur les limitations du schéma de Boussinesq	476
8.2	La question des lois constitutives en turbulence	477
8.3	Extensions des schémas à viscosité effective	478
8.4	Schéma visco-élastique	483
13	FERMETURES AU SECOND ORDRE	485
1	Introduction	485
2	Les mécanismes à modéliser	486
3	Retour sur les équations	486
3.1	Corrélation avec la fluctuation de pression	487
3.2	Dissipation	487
3.3	Équations à modéliser	488
4	Dissipation	489
4.1	La question du modèle de dissipation	489
4.2	Le problème isotrope de dégénérescence énergétique	490

4.3	Fermeture isotrope de l'équation de la dissipation	490
4.3.1	Le schéma isotrope classique	491
4.3.2	Extension homogène anisotrope	492
4.4	Fermeture inhomogène de l'équation de dissipation	493
4.4.1	Base de la fermeture	493
4.4.2	Création / Destruction	493
4.4.3	Diffusion	497
4.5	Récapitulation du modèle d'équation de dissipation	498
4.6	Expression du tenseur de dissipation	499
4.6.1	Le schéma isotrope et ses limitations	499
4.6.2	Schémas anisotropes	499
5	Retour à l'isotropie	502
5.1	Exposé du problème	502
5.2	Équation d'évolution du tenseur d'anisotropie	502
5.3	Les schématisations	503
5.3.1	Le schéma linéaire	503
5.3.2	Le schéma quasi-linéaire	505
5.3.3	Les schémas non linéaires	508
5.4	Récapitulation	509
6	Les modèles d'action du champ moyen	511
6.1	Le problème fonctionnel	511
6.2	Fermetures linéaires	513
6.2.1	Le schéma isotrope	513
6.2.2	Le schéma en isotropisation de production	514
6.2.3	Le schéma linéaire anisotrope	514
6.2.4	Récapitulation et discussion des schémas linéaires	518
6.3	Fermetures non linéaires	519
6.3.1	Schémas quadratiques	519
6.3.2	Schémas à l'ordre trois	520
6.3.3	Schéma général à l'ordre quatre	522
7	Redistribution	523
8	Diffusion turbulente	525
8.1	Formulation du problème	525
8.2	Les modèles de diffusion	525
8.3	Remarques sur la modélisation du transport diffusif	528
9	Récapitulation et discussion générale	529
9.1	Performances d'un modèle linéaire au second ordre	529
9.2	Améliorations du modèle linéaire de base	532
9.2.1	Incidence de la schématisation de la redistribution	532
9.2.2	Incidence de la schématisation de la dissipation	535
9.3	Limitations avérées	536

14 FERMETURES À FAIBLE NOMBRE DE REYNOLDS	539
1 Introduction	539
2 Retour sur les spécificités de la turbulence de paroi	540
3 Schémas algébriques en couche limite	541
3.1 Amortissement pariétal de la viscosité de turbulence	541
3.2 Schémas de viscosité à double couche	542
3.2.1 Schéma de Smith-Cebeci	542
3.2.2 Schéma de Baldwin-Lomax	543
3.2.3 Domaine d'application des fermetures algébriques	544
4 Modèles à une équation	545
4.1 Panorama des fermetures à une équation	545
4.2 Modèle à équation d'énergie cinétique de turbulence	546
4.3 Modèles à équation de transport de viscosité	546
5 Modèles à deux équations	548
5.1 Variantes "bas Reynolds" du modèle $\bar{k}, \bar{\epsilon}$	549
5.2 Autres modèles linéaires du premier ordre	552
5.2.1 Autres modèles à deux équations	552
5.2.2 Les modèles composites	553
5.2.3 Le modèle à trois équations de Durbin	554
5.3 Récapitulatif des performances des modèles linéaires du premier ordre	555
5.4 Modèles non-linéaires du premier ordre	555
6 Fermetures au second ordre	556
6.1 Condition de vraisemblance bicomposante	556
6.2 Modes de détection de la paroi	557
6.3 Schémas de redistribution	558
6.3.1 Schéma général de la partie rapide	559
6.3.2 Classement des différents schémas	560
6.3.3 Modèles de première génération	561
6.3.4 Modèles de deuxième génération	565
6.4 Schémas de la dissipation	567
6.5 Schéma de diffusion	569
7 Discussion	570
 INDEX des COMPLÉMENTS et EXERCICES	 575
 INDEX ANALYTIQUE	 579
 INDEX DES CITATIONS D'AUTEURS	 585
 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 593