

Table des matières

Préface	vii
Avant-propos	ix
Première partie : Turbulence forte	1
1 Introduction	3
1.1 Bref historique	4
1.1.1 Premières avancées cognitives	4
1.1.2 Loi de Kolmogorov et intermittence	7
1.1.3 Théories spectrales et fermetures	9
1.1.4 Cascade inverse	10
1.1.5 Essor de la simulation numérique directe	12
1.1.6 La turbulence aujourd'hui	13
1.2 Chaos et imprédictibilité	14
1.3 Transition vers la turbulence	17
1.4 Outils statistiques et symétries	19
1.4.1 Moyenne d'ensemble	19
1.4.2 Autocorrélation	19
1.4.3 Distribution et densité de probabilité	21
1.4.4 Moments et cumulants	21
1.4.5 Fonctions de structure	21
1.4.6 Symétries	21
Bibliographie	22
2 Lois de Kolmogorov en hydrodynamique	29
2.1 Les équations de Navier-Stokes	29
2.2 Turbulence et chauffage	29
2.2.1 Expérience de Joule	29
2.2.2 Taux moyen de dissipation d'énergie	31
2.2.3 Brisure spontanée de symétrie	33
2.3 Équation de Kármán-Howarth	35
2.4 Hypothèse de localité et cascade	37
2.5 Loi exacte de Kolmogorov	39
2.6 Phénoménologie de Kolmogorov	42
2.7 Dissipation inertielle	43
2.7.1 Conjecture d'Onsager	43
2.7.2 Formulation faible	45
2.8 Intermittence	48
2.8.1 Qu'est-ce que l'intermittence?	49

2.8.2	Modèle fractal	51
2.8.3	Modèle log-normal	55
2.8.4	Modèle log-Poisson	57
2.8.5	Contraintes exactes	60
	Bibliographie	60
3	Théorie spectrale en hydrodynamique	65
3.1	Cinématique	65
3.1.1	Tenseur spectral	65
3.1.2	Spectre d'énergie	67
3.2	Conservation détaillée de l'énergie	67
3.3	Théorie statistique	70
3.3.1	Flux et transfert	70
3.3.2	Spectre de Kolmogorov	72
3.3.3	Hiérarchie infinie d'équations	74
3.3.4	Fermeture QN	75
3.3.5	Fermetures EDQN et EDQNM	76
3.3.6	Fermeture DIA	77
3.4	Turbulence bi-dimensionnelle	79
3.4.1	Phénoménologie de Fjørtoft	80
3.4.2	Conservation détaillée	82
3.4.3	Solutions en loi de puissance	84
3.4.4	Flux d'énergie et d'énstrophie	86
3.5	Cascade duale	89
3.6	Modèle de diffusion non-linéaire	90
	Bibliographie	92
4	Application : la turbulence magnétohydrodynamique	97
4.1	Turbulence du vent solaire	98
4.2	La MHD incompressible	100
4.3	Lois exactes des 4/3	101
4.4	Dissipation inertielle	106
4.5	Intermittence	108
4.6	Hélicité magnétique et cascade inverse	110
4.7	Conjecture d'équilibre critique	112
4.8	Perspectives	116
	Bibliographie	117
5	Perspective : la turbulence compressible	121
5.1	Turbulence supersonique du milieu interstellaire	121
5.2	Loi exacte en turbulence compressible	124
5.3	Phénoménologie compressible	126
5.4	Perspectives	127
	Bibliographie	128

Exercice et correction I	131
1. Turbulence HD 1D : l'équation de Burgers	131
2. Turbulence HD 2D : la conservation détaillée	135
Bibliographie	139
Deuxième partie : Turbulence d'ondes	141
6 Introduction	143
6.1 Bref historique	144
6.1.1 Préhistoire	144
6.1.2 Interactions d'ondes résonnantes	145
6.1.3 Méthode des échelles multiples	146
6.1.4 Spectre de Kolmogorov-Zakharov	146
6.1.5 Applications de la turbulence d'ondes	148
6.2 Méthode des échelles multiples	151
6.2.1 Équation de Duffing	151
6.3 Modèle faiblement non-linéaire	155
6.3.1 Équation fondamentale	155
6.3.2 Relation de dispersion et résonance	156
6.3.3 Développement asymptotique uniforme	157
Bibliographie	162
7 Théorie de la turbulence d'ondes capillaires	167
7.1 Introduction	167
7.2 Phénoménologie	170
7.3 Théorie analytique : équation fondamentale	173
7.4 Théorie analytique : approche statistique	176
7.5 Conservation détaillée de l'énergie	180
7.6 Solutions exactes et transformation de Zakharov	181
7.7 Nature des solutions exactes	185
7.8 Confrontation avec l'expérience	186
7.9 Simulation numérique directe	189
Bibliographie	193
8 Application : les ondes inertielles	197
8.1 Introduction	197
8.2 Que savons-nous sur la turbulence en rotation?	199
8.2.1 Expériences de laboratoire	199
8.2.2 Simulations numériques	201
8.2.3 Théories	202
8.3 Ondes inertielles hélicitaires	204
8.4 Prédications phénoménologiques	205
8.5 Théorie de la turbulence d'ondes inertielles	206
8.6 Interactions triadiques locales	209
8.6.1 Équation de diffusion non-linéaire	209
8.6.2 Solutions stationnaire et auto-similaire	211

8.6.3	Étude numérique	213
8.6.4	Universalité de l'anomalie spectrale	215
8.7	Perspectives	217
	Bibliographie	218
9	Application : les ondes d'Alfvén	223
9.1	La MHD en variables d'Elsässer	223
9.2	Phénoménologie d'Iroshnikov-Kraichnan	225
9.2.1	Fondement de la phénoménologie triadique	225
9.2.2	Phénoménologie anisotrope	228
9.3	Théorie de la turbulence d'ondes d'Alfvén	228
9.3.1	Variables canoniques	228
9.3.2	Condition de résonance	229
9.3.3	Équations cinétiques	231
9.3.4	Traitement du mode 2D ($k_{\parallel} = 0$)	234
9.3.5	Autres résultats	234
9.4	Simulation numérique directe	236
9.5	Application : la couronne solaire	237
9.6	Au-delà de la MHD standard	240
9.7	Perspectives	241
	Bibliographie	242
10	Perspective : la turbulence d'ondes gravitationnelles	249
10.1	Turbulence d'ondes gravitationnelles	249
10.2	Conclusion	255
	Bibliographie	255
	Exercice et correction II	257
1.	Modèle MHD de diffusion non-linéaire	257
2.	Turbulence d'ondes gravitationnelles	259
	Bibliographie	262
	Annexe : formulaire	263
	Index	267