

Sébastien Galtier

LICENCE 3 & MASTER
PHYSIQUE FONDAMENTALE
ÉCOLES D'INGÉNIEURS



Magnéto- hydrodynamique

Des plasmas de laboratoire à l'astrophysique

- Cours complet
- Exercices d'application corrigés
- Formulaire & notations

Vuibert

2-538-15-1

Sébastien Galtier

Magnéto- hydrodynamique

Des plasmas de laboratoire à l'astrophysique

Cours & exercices corrigés

LICENCE 3 ET MASTER
PHYSIQUE FONDAMENTALE
& ÉCOLES D'INGÉNIEURS

Vuibert

Table des matières

Avant-propos	5
Notations	7
Introduction Générale	9
1 La Physique des Plasmas	11
1.1 Une révolution en physique	11
1.2 Des gaz aux plasmas	14
1.3 Les équations cinétiques	16
1.4 Phénomènes collectifs	20
1.5 Du cinétique au fluide	25
1.6 Plasmas naturels et de laboratoire	27
2 La Magnétohydrodynamique	31
2.1 Introduction	31
2.2 Vers une formulation de la MHD	34
2.3 Quasi-neutralité	37
2.4 Équations de la MHD généralisée	38
2.5 Limite incompressible	40
2.6 La MHD idéale	41
2.7 Applications de la MHD	42
3 Lois de Conservation	45
3.1 Masse	46
3.2 Quantité de mouvement	46
3.3 Énergie	47
3.4 Hélicité croisée	50
3.5 Hélicité magnétique	52
3.6 Théorème d'Alfvén	53
3.7 Topologie magnétique	56

Exercices	61
Processus Fondamentaux	63
4 Ondes MHD	65
4.1 Tension magnétique	65
4.2 Ondes d'Alfvén	67
4.3 Ondes magnéto-sonores	70
4.4 Ondes d'Alfvén dispersives	72
5 Effet Dynamo	79
5.1 Géophysique et astrophysique	80
5.2 Nombre de Reynolds magnétique critique	86
5.3 Régime cinématique	88
5.4 Théorèmes anti-dynamo	91
5.5 Dynamo de Ponomarenko	93
5.6 Dynamo turbulente	98
6 Discontinuités et Chocs	101
6.1 Conditions de Rankine-Hugoniot	103
6.2 Discontinuités	107
6.3 Chocs	110
6.4 Conclusion	111
7 Reconnexion Magnétique	113
7.1 Nappe de courant en MHD idéale	114
7.2 Modèle de Sweet-Parker	117
7.3 Reconnexion sans collision	121
7.4 Perspectives	123
Exercices	125
Instabilités et Confinement Magnétique	127
8 Équilibre Statique	129
8.1 Équations d'équilibre	129
8.2 Confinement magnétique par pincement θ	130
8.3 Confinement magnétique par pincement z	132
8.4 Configuration toroïdale de tokamak	134
8.5 Équilibre sans force	139
9 Théorie Linéaire des Perturbations	143
9.1 Instabilités	143
9.2 Cinétique <i>versus</i> fluide	146
9.3 Critère énergétique de stabilité	148

9.4	Théorie perturbative	153
10	Étude d'Instabilités MHD	161
10.1	Stabilité des ondes MHD	161
10.2	Instabilité de Rayleigh-Taylor	165
10.3	Instabilité de Kruskal-Schwarzschild	170
10.4	Instabilité de confinement « Z-pinch »	174
10.5	Instabilité de confinement « Z- θ pinch »	184
10.6	Instabilité magnéto-rotationnelle	185
	Exercices	193
	Turbulence	195
11	Turbulence Hydrodynamique	197
11.1	Qu'est-ce que la turbulence?	198
11.2	Outils statistiques et symétries	202
11.3	Loi exacte de Kolmogorov	206
11.4	Phénoménologie de Kolmogorov	214
11.5	L'intermittence	215
11.6	Approche spectrale	216
12	Turbulence MHD	223
12.1	Plasmas astrophysiques et de tokamaks	223
12.2	Lois exactes en MHD	230
12.3	Phénoménologie d'Iroshnikov-Kraichnan	233
12.4	L'intermittence en MHD	238
12.5	Hélicité magnétique et cascade inverse	238
12.6	Conjecture de l'équilibre critique	241
12.7	Régime de turbulence d'ondes d'Alfvén	244
12.8	Turbulence MHD Hall	247
13	Turbulence Avancée	251
13.1	Théories de l'intermittence	251
13.2	Théorie de turbulence d'ondes d'Alfvén	263
	Exercices	271
	Annexe 1 : Correction des exercices	273
	Annexe 2 : Formulaire	283
	Annexe 3 : Ouvrages de référence	287
	Bibliographie	289
	Index	299

Sébastien Galtier

Magnéto- hydrodynamique

Des plasmas de laboratoire à l'astrophysique

Rédigé principalement à l'attention des étudiants en Master (M1 et M2) de physique fondamentale et appliquée, ce **cours de magnétohydrodynamique** est complété par de **nombreux exercices corrigés** dont certains portent sur des sujets d'actualité. Par sa nature interdisciplinaire, cet ouvrage intéressera les étudiants qui souhaitent se spécialiser en astrophysique, fusion magnétique, physique des plasmas ou mécanique des fluides. Ce manuel sera également un excellent support de travail pour des étudiants en troisième année de Licence ou en écoles d'ingénieur.

Sommaire

I. Introduction générale

1. La physique des plasmas
2. La magnétohydrodynamique
3. Lois de conservation

II. Processus fondamentaux

4. Les ondes MHD
5. Effet dynamo
6. Discontinuités et chocs
7. Reconnexion magnétique

III. Instabilités et confinement magnétique

8. Équilibre statique

9. Théorie linéaire des perturbations

10. Études d'instabilités MHD

IV. Turbulence

11. Turbulence hydrodynamique
12. Turbulence MHD
13. Turbulence avancée

V. Solutions des exercices

VI. Annexes

Formulaire - Bibliographie - Index

Astrophysicien, membre de l'Institut universitaire de France, Sébastien Galtier est professeur à l'Université Paris-Saclay. Ses recherches portent principalement sur la turbulence magnétohydrodynamique. Il est responsable du parcours (M2) francilien de physique des plasmas et préside le conseil scientifique du programme national Soleil-Terre de l'INSU/CNRS.