

UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER-GRENOBLE I
SCIENCES & GÉOGRAPHIE

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER

Discipline: Astrophysique et Milieux Dilués

Présentée et soutenue publiquement

par

Sébastien GALTIER

à l'Observatoire de la Côte d'Azur

le 21 décembre 1998

**Turbulence et Intermittence en Magnétohydrodynamique :
Application à la Couronne Solaire**

Directrice de thèse :

Mme Pouquet Annick *Observatoire de la Côte d'Azur*

COMPOSITION DU JURY :

M.	Pelletier Guy	<i>Observatoire de Grenoble</i>	Président
M.	Newell Alan C.	<i>Université de Warwick</i>	Rapporteur
M.	Priest Eric R.	<i>Université de St Andrews</i>	Rapporteur
Mme	Falgarone Edith	<i>E.N.S. de Paris</i>	Examinatrice
M.	Fournier Jean-Daniel	<i>Observatoire de la Côte d'Azur</i>	Examinateur
M.	Frisch Uriel	<i>Observatoire de la Côte d'Azur</i>	Examinateur
Mme	Politano Hélène	<i>Observatoire de la Côte d'Azur</i>	Examinatrice
M.	Vial Jean-Claude	<i>Institut d'Astrophysique Spatiale</i>	Examinateur

Table des matières

Remerciements	5
I Introduction Générale	7
1 Turbulence en Astrophysique : Quelques Exemples	9
1.1 Une mesure de la turbulence	9
1.2 De l'héliosphère aux grandes structures de l'univers	11
2 Turbulence MHD	13
2.1 Les équations de la MHD standard	13
2.2 Hydrodynamique et magnétohydrodynamique	14
2.3 Les modèles d'avalanches	18
2.4 L'attrait des modèles unidimensionnels	21
2.5 Interaction d'ondes résonantes et turbulence faible	23
3 Turbulence et Intermittence	27
3.1 L'intermittence, une des signatures de la turbulence	27
3.2 Un exemple d'intermittence : la couronne solaire	29
II Chauffage de la Couronne Solaire	45
1 Présentation du Modèle	47
2 Solar Flares Statistics with a 1-D MHD Model	49
[S. Galtier & A. Pouquet; <i>Solar Physics</i> 179, 141-165, (1998)]	
2.1 Introduction	50
2.2 One-dimensional MHD	52
2.3 Statistics of events	56
2.4 Discussion	69
2.5 References	74

3 A 1-D MHD Model of Solar Flares : Emergence of a Population of Weak Events, and a Possible Road Towards Nano-Flares 79

[S. Galtier ; Submitted to *The Astrophysical Journal*, (1998)]

3.1 Introduction 80
 3.2 A 1-D MHD Model of Flaring 81
 3.3 Towards a Classification of Dissipative Events? 87
 3.4 Emergence of a Population of Weak Events 88
 3.5 Summary and Conclusion 91
 3.6 References 94

4 Intermittent Heating in Solar Coronal Loops 97

[R.W. Walsh & S. Galtier ; Prepublication, (1998)]

4.1 Introduction 98
 4.2 One Dimensional MHD Flare Model 100
 4.3 Coronal Loop Model 101
 4.4 Time Dependent Heat Deposition 102
 4.5 Temporal Variations of an Initially Static Loop 104
 4.6 Summary and Conclusions 109
 4.7 References 111

III Une équation à la Burgers pour la MHD 113

1 Analyse singulariste et étude numérique de solutions localisées 115

2 Meromorphy and Topology of Localized Solutions in the Thomas–MHD Model 117

[J.-D. Fournier & S. Galtier ; Prepublication, (1998)]

2.1 Introduction 118
 2.2 The traveling waves at infinite Prandtl number : exact results 119
 2.3 The dynamically forbidden, admissible and preferred configuration of the shocks defects 124
 2.4 Magnetic rarefaction defects and complex residues 138
 2.5 Conclusions 144
 2.6 References 145

IV Un Modèle de Décroissance Énergétique en MHD 149

1 Rôle des ondes d’Alfvén dans la dynamique de la turbulence MHD 151

2	Self-Similar Energy Decay in Magnetohydrodynamic Turbulence	153
	[S. Galtier, H. Politano & A. Pouquet ; <i>Phys. Rev. Lett.</i> 79, 2807-2810, (1997)]	
3	Parametric Investigation of Self-Similar Decay Laws in MHD Turbulent Flows	163
	[S. Galtier, E. Zienicke, H. Politano & A. Pouquet ; <i>Submitted to J. Plasma Phys.</i>]	
3.1	Introduction	164
3.2	Slowing-down of energy decay in MHD flows	166
3.3	One-dimensional MHD	170
3.4	Numerical Simulations in Two Dimensions	174
3.5	Discussion and Conclusion	188
V	La Turbulence Faible	201
1	Le Formalisme de Turbulence Faible pour la MHD	203
2	A Weak Turbulence Theory for Incompressible MHD	205
	[S. Galtier, S. Nazarenko, A.C. Newell & A. Pouquet ; <i>Prepublication</i>, (1998)]	
2.1	Introduction	206
2.2	The derivation of the kinetic equations	208
2.3	General properties of the kinetic equations	213
2.4	Two-dimensional state	216
2.5	Nonlocal isotropic 3D MHD turbulence	228
2.6	Conclusion	231
2.7	Appendix	233
VI	Conclusions et Perspectives	239
VII	Actes de Congrès	243
1	One-Dimensional MHD as a Plausible Model for Solar Flares	245
	[S. Galtier & A. Pouquet; <i>Science with THEMIS</i>, 171-174, (1997)]	
1.1	Introduction	246
1.2	One Dimensional MHD Models For Solar Flares	246
1.3	Conclusion	247
2	Intermittency in MHD Flows	251

[S. Galtier, T. Gomez, H. Politano & A. Pouquet; *Advances in Turbulence VII*, 453-456, (1998)]

3 A One-Dimensional MHD Model of Solar Flares : Statistics or Physics? 257

[S. Galtier, H. Politano & A. Pouquet; *IUTAM Boulder*, (1998)]

3.1	Introduction	258
3.2	The model	258
3.3	The structures	260
3.4	The histograms	261
3.5	From bursty dissipation to intermittent heating	264
3.6	The two-dimensional case	265
3.7	Conclusion	265

4 Mechanisms of injection and dissipation of energy and their relation to the dynamics of the interstellar medium 269

[A. Pouquet, S. Galtier & H. Politano; *Naramata Workshop*, (1998)]

4.1	Introduction	270
4.2	Low-Dimensional Approach	270
4.3	The law of energy decay	274
4.4	A model for the heating of the solar corona	275
4.5	Compressible flows	276
4.6	Conclusion	278

VIII Bibliographie Générale 283

Liste de Publications 303