

Table des matières

Remerciements	5
Sommaire	9
Notations utilisées	11
Problématique générale	15
1 Observations et modèles de la photosphère solaire	19
1.1 Introduction	19
1.2 Phénoménologie de la zone convective du Soleil	20
1.2.a Convection en profondeur	20
1.2.b Convection photosphérique	21
1.3 Histoire de l'observation de la dynamique photosphérique	21
1.3.a Méthodes d'observation et d'analyse	22
1.3.b Données relatives à la granulation	24
1.3.c La dynamique de la supergranulation	25
1.3.d Le problème de la mésogranulation	27
1.3.e Magnétisme et dynamique dans la photosphère	29
1.4 Expériences numériques sur la convection turbulente	31
1.4.a Les pionniers	31
1.4.b Propriétés des modèles détaillés de la granulation	32
1.4.c Propriétés des simulations d'atmosphères polytropiques	34
1.4.d Simulations à grands rapports d'aspects	37
1.5 Une tentative de synthèse	40
1.5.a Granulation solaire	40
1.5.b Le modèle standard de la convection à la surface du Soleil	41
1.5.c Le modèle en question : et la turbulence ?	42
1.5.d Que nous apportent les simulations numériques ?	44
1.6 Conclusion	45

2	Équations MHD dans un milieu fortement stratifié	47
2.1	Introduction	47
2.2	Système physique étudié	47
2.2.a	Cadre général	48
2.2.b	Paramètres caractéristiques	48
2.3	Équations sans dimension	49
2.4	Différents équilibres hydrostatiques	49
2.4.a	Les polytropes	50
2.4.b	L'atmosphère isotherme	50
2.4.c	Échelles de hauteur, temps caractéristiques	50
2.5	Conditions aux limites	51
2.6	Définitions diverses et variées	52
2.6.a	Nombre de Rayleigh	52
2.6.b	Équation pour l'énergie	52
2.6.c	Nombre de Nusselt	53
3	Approche linéaire de la supergranulation solaire	55
3.1	Introduction	55
3.2	Justification des hypothèses de l'étude	57
3.2.a	Utilisation de diffusivités turbulentes	57
3.2.b	Conditions aux limites sur la température	57
3.3	Détails du modèle linéaire	58
3.3.a	Linéarisation pour un fluide complètement compressible	58
3.3.b	Forme anélastique	60
3.3.c	Équation cubique dans l'approximation de Boussinesq	61
3.4	Résultats	62
3.4.a	Méthode numérique	62
3.4.b	Diverses configurations	62
3.5	Développements analytiques dans l'approximation de Boussinesq	67
3.5.a	Résolution de l'équation cubique	67
3.5.b	Dépendance de R_c vis-à-vis de Q pour $a = 0$	69
3.5.c	Transition vers une longueur d'onde finie	69
3.6	Discussion	70
4	Simulations numériques à grand rapport d'aspect	75
4.1	Introduction	75
4.2	La simulation	77
4.2.a	Paramètres physiques et numériques	77
4.2.b	Commentaires	77
4.2.c	Définition des spectres	78
4.3	Description de l'écoulement	78
4.3.a	Évolution temporelle	79
4.3.b	Régime quasi-stationnaire	85
4.4	Analyse dans l'espace de Fourier	95

4.4.a	Quelle loi de puissance pour les spectres?	97
4.4.b	Dynamique et transfert non-linéaire dans l'espace spectral .	103
4.5	Les simulations et la photosphère solaire	106
4.5.a	Comparaison avec la convection radiative	106
4.5.b	Interprétation dans le cadre photosphérique	107
4.5.c	Et la supergranulation?	111
4.6	Récapitulatif des résultats	115
5	Théories de champ moyen	119
5.1	Introduction	119
5.2	Effet AKA et viscosité turbulente	121
5.2.a	Phénoménologie	121
5.2.b	Expression des coefficients	123
5.2.c	Écoulements non périodiques et instabilités de phase	125
5.3	Méthode numérique de résolution	127
5.3.a	Principe général du code	127
5.3.b	Disposition des données	128
5.3.c	Blocs matriciels	130
5.3.d	Conditions aux limites	131
5.3.e	Algorithmes utilisés	131
5.4	Calculs de viscosités turbulentes dans des écoulements simples . .	133
5.4.a	Écoulement de Kolmogorov	133
5.4.b	Écoulement hexagonal simple	133
5.4.c	Écoulement hexagonal décoré	136
5.5	Conclusions	138
	Conclusions et perspectives	141
A	Méthodes numériques et tests	145
A.1	Historique et objectifs	145
A.2	Fonctionnement général du code	146
A.2.a	Organisation des données	146
A.2.b	Schémas numériques de différentiation spatiale	147
A.2.c	Schéma temporel	151
A.2.d	Le dilemme compressible/ incompressible	151
A.2.e	Interface de traitement	151
A.3	Tests numériques	152
A.3.a	Pas de temps et résolution spatiale	152
A.3.b	Tests de performances et de parallélisation	153
A.4	Tests du code sur quelques problèmes de physique	156
A.4.a	Ondes sonores	156
A.4.b	Convection dans un polytrophe sans champ magnétique . . .	157
A.4.c	Instabilité de magnétoconvection - Overstabilité	158
A.5	Conclusions	160

B Oscillations alfvéniques d'une coquille sphérique	163
B.1 Introduction	163
B.1.a Avant-propos	163
B.1.b Oscillations magnétiques stellaires	163
B.2 Oscillations magnétiques en géométrie sphérique	165
B.2.a Modèle et équations	165
B.2.b Décomposition harmonique des équations MHD	167
B.2.c Symétries et classification des modes propres	168
B.2.d Les ondes d'Alfvén en résumé	169
B.3 Modes axisymétriques poloïdaux	169
B.3.a Modes stationnaires	169
B.3.b Modes oscillants	170
B.3.c Couches de cisaillement internes	171
B.4 Modes axisymétriques toroïdaux	172
B.4.a Spectre	173
B.4.b Singularité et couches limites	173
B.5 Solutions asymptotiques à faible diffusivité	174
B.6 Conclusions et extensions possibles	179
B.6.a Principaux résultats	179
B.6.b Perspectives	179
Bibliographie	185
Liste des publications	199
Liste des communications	201
Table des matières	203

