

Table des matières

I	Introduction générale	1
1	Présentation	2
2	La structure interne du Soleil	2
2.1	Le coeur du Soleil	3
2.2	La zone radiative	3
2.3	La tachocline	3
2.4	La zone convective	3
3	L'atmosphère solaire	4
3.1	La photosphère	4
3.2	La chromosphère	4
3.3	La région de transition	4
3.4	La couronne	5
4	Les protubérances-filaments	5
5	Plan de la thèse	6
II	Physique des plasmas. Magnétohydrodynamique	9
1	Description d'un plasma	10
2	La MHD	13
2.1	Équations de Maxwell	13
2.2	Équations de conservation	14
2.3	Loi d'Ohm, MHD idéale	15
2.4	Hypothèses de la MHD	16
3	Équilibre magnétostatique	16
3.1	Champ potentiel	17
3.2	Champ sans-force	17
4	Les ondes MHD	18
III	Reconstruction du champ magnétique coronal	23
1	Introduction	24
1.1	Mesures du champ magnétique	24
1.2	Les différents modèles	25
1.3	Problématique	26
2	Description de la région active	26

2.1	Les observations	26
2.2	Les structures caractéristiques de la région	27
2.3	L'évolution temporelle de la région	28
2.4	Conclusions	34
3	Analyse des données magnétiques	34
3.1	Champ magnétique longitudinal : MDI	34
3.2	Champ magnétique vectoriel : HSP et IVM	35
3.3	Préparation des données pour l'extrapolation	40
4	Champ magnétique sans-force non linéaire	41
4.1	Méthode	41
4.2	Reconstruction de la région active 8151	44
5	Comparaison avec les modèles potentiel et sans-force linéaire	47
5.1	Méthodes de reconstruction potentielle et sans-force linéaire	47
5.2	Comparaison entre les différents modèles	48
6	Analyse du champ sans-force non linéaire	48
6.1	Observations-Champ sans-force non linéaire	48
6.2	Influence de la résolution spatiale	50
6.3	HSP-IVM	51
7	Discussion et conclusions	53
IV Structure du filament		55
1	Introduction	56
2	Recherche de creux magnétiques	56
3	Le filament de la région active 8151	57
4	Discussion et conclusions	58
V Oscillations dans les filaments		61
1	Introduction	62
1.1	Les observations	62
1.2	Les modèles	63
1.3	La région étudiée	64
2	Les observations SUMER	66
2.1	Caractéristiques des observations	66
2.2	Série temporelle en vitesse	67
2.3	Analyse de Fourier	69
2.4	Commentaires	70
3	Modèle de filament appliqué aux oscillations	72
3.1	Modèle de Joarder et Roberts	72
3.2	Modes d'oscillations	73
3.3	Analyse paramétrique des modes d'oscillations	75
3.4	Observabilité des modes	79
4	Comparaison observations-modèle	79
4.1	Identification des modes	79
4.2	Méthode indirecte de diagnostic	80

5	Discussion et conclusions	82
V.A	Méthode des modes normaux	85
1	Opérateur des petits mouvements	85
2	Expressions des perturbations	87
3	Équations de dispersion	87
4	Diagnostic du filament	89
VI	JOP124 : filament éruptif dans les régions actives	93
1	Description et objectifs du JOP 124	94
2	La campagne MEDOC de mai 2000	95
2.1	Liste des observations	95
2.2	La région active observée	96
3	Analyse des oscillations	98
3.1	CDS	98
3.2	DPSM	102
4	Discussion et conclusions	103
VI.A	Résultats complémentaires : évolution d'un filament	104
VII	Conclusions	107
1	Objectifs des travaux de thèse	108
2	Résultats de la reconstruction	108
3	Résultats de l'étude des oscillations	109
4	Prolongement de ces travaux	110
A	Les regards tournés vers le Soleil	A-I
A-1	La mission SOHO	A-II
A-2	Les campagnes MEDOC	A-III
A-3	Magnétographes	A-IV
1	MDI/SOHO	A-IV
2	HSP et IVM (Mees Solar Observatory)	A-V
A-4	Spectrographes, spectromètres	A-VI
1	SUMER/SOHO	A-VI
2	CDS/SOHO	A-VII
3	DPSM/THEMIS	A-VII
B	Activités de thèse	B-I
C	Articles et proceedings	C-I

Table des figures

I.1	Situation du Soleil dans la Voie Lactée (à gauche), structure du Soleil du coeur à la couronne (à droite).	2
II.1	Classement des plasmas spatiaux et terrestres en fonction de la densité et de la température	10
III.1	Position et environnement de la région active 8151 le 11 Février 1998 : image EIT dans la raie FeXII à 195 Å (à gauche) et image SXT en rayons X "mous" (à droite en négatif). On remarque que la région active ne possède pas de connexion avec d'autres régions actives voisines ou de l'autre hémisphère solaire.	28
III.2	Description de la région active 8151 observée le 11 Février 1998 (champ de vue de 300''×300''). En haut à gauche : distribution du champ magnétique longitudinal (MDI) ; en haut à droite : filament (Obs. Paris-Meudon) ; en bas à gauche : système de boucles coronales (EIT) ; en bas à droite : sigmoïde (SXT).	29
III.3	Évolution temporelle de la distribution du champ magnétique longitudinal entre le 10 et le 12 Février 1998 : à gauche le 10 Février à 22:24 UT ; au centre le 11 Février à 17:36 UT ; à droite le 12 Février à 16:00 UT. Champ de vue de 300''×300''.	30
III.4	Évolution temporelle du filament : à gauche le 11 Février à 08:58 UT ; au centre le 12 Février à 09:19 UT ; à droite le 13 Février à 08:19 UT. Champ de vue de 600''×600''.	30
III.5	Évolution temporelle du système de boucles coronales et du canal de filament observé par EIT dans la raie du FeXII à 195 Å : à gauche le 11 Février à 08:50 UT ; au centre le 12 Février à 08:51 UT ; à droite le 12 Février à 13:51 UT. Champ de vue de 600''×600''.	31
III.6	Évolution des pieds des boucles (régions brillantes) observés par CDS dans la raie de l'OV à 554 Å. À gauche : le 11 Février à 19:50 UT (avant l'éruption). À droite : le 12 Février à 18:07 UT (après l'éruption). Champ de vue de 120''×120''.	32

III.7	Évolution temporelle du sigmoïde observé en rayons X "mous" : à gauche le 12 Février à 12:59 UT; au centre le 12 Février à 13:19 UT; à droite le 12 Février à 14:58 UT. Champ de vue de $600'' \times 600''$	32
III.8	Évolution du sigmoïde observé par CDS dans la raie du FeXVI à 360 Å.	33
III.9	Développement de la CME observée le 12 Février 1998. Série de différences d'images LASCO C2.	34
III.10	Champ magnétique vectoriel de la région active 8151 observé par HSP le 11 Février 1998 à 19:47 UT	37
III.11	Tableau : Valeurs caractéristiques du champ magnétique vectoriel et de la densité de courant électrique vertical calculées à partir des observations HSP. Figure : Distribution de la densité de courant vertical.	38
III.12	Observations IVM de la région active 8151 le 11 Février 1998 à 17:35 UT : image du continu (en haut à gauche), les trois composantes du champ magnétiques B_{LOS} (en haut à droite), B_{Trans} (en bas à gauche) et B_{Azim} (en bas à droite).	39
III.13	Les composantes B_x , B_y et B_z du champ magnétique vectoriel après la transformation en coordonnées héliographiques et la résolution de l'ambiguïté de 180°	40
III.14	Distribution de la composante verticale du champ magnétique (à gauche) : image composite IVM et MDI; distribution de la densité de courant vertical (positif en blanc, négatif en noir)	41
III.15	À gauche : distribution de α (valeurs positives en clair, valeurs négatives en sombre; à droite : histogrammes des valeurs de α pour la polarité négative (pointillés-tirets), pour la polarité positive (tirets) et pour la région active entière (trait plein).	42
III.16	Grille non uniforme dans le plan photosphérique (directions x et y) de 148×128 noeuds utilisée pour le calcul du champ sans force non linéaire de la région active 8151	44
III.17	Tubes de flux caractéristiques de la région active 8151 dans l'hypothèse d'un champ sans-force non linéaire : vue de dessus (à gauche), vue de côté (à droite)	45
III.18	Visualisation d'une partie du tube de flux (1) pour mettre en évidence la torsion des lignes de champ	46
III.19	Comparaison entre les modèles de champ potentiel (à gauche), de champ sans-force linéaire (au centre) et non linéaire (à droite). Pour les 3 modèles, les 3 tubes de flux sélectionnés ont les mêmes pieds dans la polarité positive. On note les différences de topologie et de géométrie (hauteur des lignes de champ) entre les modèles.	49
III.20	Tubes de flux (1), (2) et (3) dans le cas d'une grille réduite d'un facteur 8 pour le champ potentiel (à gauche) et pour le champ sans-force non linéaire (à droite)	51
III.21	Lignes de champ caractéristiques de la région active 8151 obtenues à partir des données HSP dans le cas potentiel (à gauche) et sans-force non linéaire (à droite)	52

IV.1	Vue de dessus des tubes de flux possédant des creux magnétiques susceptibles de supporter la matière contenue dans le filament	57
IV.2	Vue de coté des configurations magnétiques possédant des creux magnétiques : configuration quadripolaire (à gauche), long tube de flux torsadé (à droite)	58
IV.3	Exemple d'une structure quadripolaire présentant une nappe de courant verticale située sous les creux magnétiques	59
V.1	Modèles de protubérances de Oliver et al. (1992) et de Joarder et al. (1997)	64
V.2	Description globale de la région active 8725 le 13 Octobre 1999	65
V.3	À gauche : observation SUMER du 13 octobre à 22:17 UT. À droite : agrandissement de l'image $H\alpha$ (Fig. V.2)	67
V.4	Comparaison des profils de raie dans le filament (pointillés) et en dehors du filament (trait plein). Le profil dans le filament est plus étroit qu'en dehors du filament.	68
V.5	Série temporelle en vitesse	68
V.6	Moyenne temporelle de la série en vitesse : la position du filament (resp. de la région calme) est définie entre les deux traits pleins (resp. les deux traits en pointillés).	69
V.7	Spectres de puissance dans le filament et dans la région calme	70
V.8	Modèle de Joarder & Roberts	72
V.9	Variations des fréquences primaires des modes d'Alfvén (*), des modes magnétoacoustiques lents ($\square$) et rapides ($\times$) en fonction de l'angle ϕ (en haut à gauche), du module du champ magnétique (en haut à droite), et de la densité (à gauche).	78
V.10	Évolution du module du champ magnétique B en fonction de la densité ρ_0 du filament. L'intervalle de champ magnétique (entre 10 et 70 G) caractéristique d'un filament délimite un intervalle de densité (entre $1.2 \cdot 10^{11}$ et $5.6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$).	82
VI.1	À gauche : distribution du champ magnétique longitudinal observé avec MDI le 14 Mai à 09:36 UT. À droite : image $H\alpha$ (Obs. Paris-Meudon) le 14 Mai à 05:44 UT. Le filament (en sombre) de forme semi-circulaire est appelé "l'anneau de Mai".	96
VI.2	Vue globale de la région active 9005 observée le 14 Mai 2000 par EIT : HeII à 304 Å (en haut à gauche), FeIX/X à 171 Å (en haut à droite), FeXII à 195 Å (en bas à gauche), et FeXV à 284 Å (en bas à droite)	97
VI.3	Séries temporelles en intensité (colonne de gauche) et en vitesse (colonne de droite) pour la raie HeI à 584 Å, HeII à 304 Å, OIII à 599 Å et MgX à 609 Å (de haut en bas)	99
VI.4	Évolution de la vitesse moyennée sur la fente au cours du temps avant (à gauche) et après (à droite) la correction de la dérive thermique pour HeI à 584 Å, HeII à 304 Å et Mg X à 609 Å (de haut en bas)	100

VI.5	Spectre de puissance dans la filament de la région active 9005 pour les raies HeI (en haut à gauche), HeII (en haut à droite), OIII (en bas à gauche), MgX (en bas à droite)	101
VI.6	DPSM : observations H α le 14 Mai 2000 à 10:21 UT. À gauche : intensité au centre de la raie ; à droite : distribution des vitesses	102
VI.7	Spectre de puissance dans le filament pour la série temporelle en vitesse du 14 Mai 2000 entre 10:07 et 11:02 UT	103
VI.8	Évolution d'un filament dans la raie H α par le DPSM : série temporelle en intensité (en haut) et en vitesse (en bas)	105
VI.9	Scénario de l'événement éruptif appliqué au filament F observé dans la raie H α par le DPSM	106
A.1	À gauche : schéma représentant le satellite SOHO avec l'ensemble des 12 instruments embarqués ; à droite : longueurs d'onde et raies observables avec les instruments SUMER, CDS, EIT et UVCS.	A-III
A.2	Exemple de planning scientifique CDS réalisé lors de la campagne MEDOC #5 (Mai 2000) : coordination des instruments CDS et SUMER pour les JOP 118, 124 et 95, programmes journaliers ("Synoptic Meridian Images") et programmes techniques ("QCM Logging").	A-V

Liste des tableaux

II.1	Modes oscillatoires de base dans un plasma	19
III.1	Liste des observations de la région active 8151 du 5 au 14 Février 1998. fd : images du disque solaire entier ; ar : images dont le champ de vue est réduit à la taille de la région active. (Particularités : cf Annexe A)	27
III.2	Valeurs caractéristiques du champ magnétique vectoriel et de la densité de courant électrique vertical calculées à partir des observations IVM.	38
V.1	Liste des périodes de fréquences observées dans le filament	71
V.2	Approximation des fréquences primaires et secondaires pour les modes pair et impair	74
V.3	Liste des fréquences primaires et secondaires	76
V.4	Ensemble des rapports des fréquences observées	80
V.5	Identification des fréquences observées aux fréquences primaires des modes d'oscillations théoriques	80
V.6	Équations permettant le diagnostic du filament dans le cas d'une iden- tification partielle des fréquences primaires (un couple de fréquences pri- maires utilisable pour le diagnostic) en fonction du paramètre libre choisi : la température du filament T_o , l'angle ϕ ou la vitesse d'Alfvén v_{Ao}	91
VI.1	Caractéristiques des observations du JOP 124 lors de la campagne ME- DOC #5 du 13 au 16 Mai 2000. $\Delta\lambda$: résolution spectrale ; Δt : résolution temporelle sauf (1) intervalle de temps entre deux images successives. . . .	95
VI.2	Liste des fréquences observées dans le filament pour les raies HeI et MgX .	100
A.1	Liste des campagnes MEDOC : réalisations des plannings scientifiques de SUMER et de CDS, et observations de filaments et de protubérances. . . .	A-IV

