

Chapitre VII

Conclusions

1 Objectifs des travaux de thèse

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier les propriétés du plasma et du champ magnétique constituant les protubérances-filaments. En particulier, nous nous sommes intéressés à des filaments (vus sur le disque solaire) formés dans des régions actives dans les instants qui précèdent un événement éruptif. Pour ce faire, nous avons développé deux méthodes pour obtenir des informations pertinentes sur la structure des filaments : l'extrapolation du champ magnétique photosphérique dans la couronne, et l'analyse des modes d'oscillation dans le filament. Pour chaque méthode, nous nous sommes toujours attachés à relier les observations aux résultats obtenus par des modèles analytiques ou numériques.

2 Résultats de la reconstruction

La méthode de reconstruction consiste à extrapoler le champ magnétique mesuré au niveau de la photosphère dans la couronne. Nous considérons qu'à un instant donné la structure est en équilibre magnétostatique dans la couronne. Plusieurs hypothèses peuvent être développées :

- le champ potentiel ou sans courant dans lequel la configuration magnétique ne contient aucun courant électrique. Cette hypothèse requiert la connaissance de la composante verticale du champ magnétique photosphérique ;
- le champ sans-force linéaire pour lequel la densité de courant est parallèle au champ magnétique. Le paramètre constant α relie alors ces deux quantités. Le calcul de ce champ magnétique nécessite de connaître la composante verticale du champ magnétique photosphérique ainsi qu'une estimation de α ;
- le champ sans-force non linéaire considère que le paramètre α dépend de la position mais reste uniforme le long d'une ligne de champ. Pour ce calcul, les trois composantes du champ magnétique photosphérique doivent être connues.

Nous avons principalement étudié le modèle de champ sans-force non linéaire à l'aide des codes numériques développés par Amari et al. (1997). Dans un premier temps, nous avons analysé les magnétogrammes vectoriels fournis par IVM et HSP (Mees Solar Observatory, Hawaï) pour en déduire la distribution de la composante verticale du champ magnétique ainsi que les distributions de la densité de courant verticale et du paramètre α au niveau photosphérique. Cette étude révèle la présence de fortes valeurs négatives et positives du paramètre α dans une même polarité caractérisant l'existence de courants de retour. L'obtention de ces distributions nécessite de fixer des valeurs limites des composantes du champ magnétique : 50 G pour la composante longitudinale, 200 G pour les composantes transverses. Nous avons appliqué le cas du champ sans-force non linéaire à la région active 8151 observée en Février 1998. Les lignes de champ obtenues par la reconstruction mettent en valeur le cisaillement et la torsion des tubes de flux associés à l'existence de courants électriques non uniformes dans la configuration magnétique. En particulier, nous avons fait ressortir trois tubes de flux (fortement, faiblement, ou pas torsadé) qui sont en excellent accord avec les observations coronales obtenues par EIT/SOHO et SXT/Yohkoh. L'énergie magnétique E_m et l'hélicité magnétique relative de la configu-

ration magnétique ΔH_m peuvent aussi être calculées :

$$E_m = 6.4 \cdot 10^{31} \text{ erg} \quad \text{et} \quad \Delta H_m = 4.7 \cdot 10^{34} \text{ G}^2 \cdot \text{cm}^4$$

Les trois hypothèses d'équilibre magnétostatique sont comparées. La valeur de α est fixée en considérant l'hypothèse de Taylor. Il est important de noter les différences topologiques et géométriques entre les trois modèles. Plus le courant électrique injecté dans la configuration magnétique est élevé, plus l'altitude des tubes de flux diminue et moins les tubes de flux sont larges.

Les limites imposées aux composantes du champ magnétique ne permettent pas d'obtenir directement la configuration magnétique du filament par cette méthode. Par contre, les filaments sont généralement supportés par des lignes de champ présentant des creux magnétiques caractérisant les lieux où de la matière froide et dense peut se maintenir en équilibre. La recherche de tels creux magnétiques, nous permet de déduire que la matière composant le filament est supportée par le champ magnétique d'un long tube de flux torsadé. L'altitude de cette structure est estimée à 30 Mm.

3 Résultats de l'étude des oscillations

Des ondes se propagent dans les structures magnétiques solaires selon les propriétés du champ magnétique et la nature du plasma. L'étude des ondes magnétohydrodynamiques se propageant dans les filaments semble donc un moyen indirect d'obtenir un diagnostic de cette structure (détermination de la densité, de la température et du champ magnétique).

Dans le but de prouver l'existence de telles ondes dans les filaments, nous avons défini un programme d'observation avec le spectromètre SUMER/SOHO. Pour la raie de l'hélium neutre à 584 Å, la série temporelle en vitesse Doppler est soumise à une analyse de Fourier. Le spectre de puissance obtenu met en évidence des fréquences caractéristiques entre 0.25 et 3 mHz (entre 1 h 30 min et 5 min).

Nous avons ensuite utilisé le modèle de Joarder & Roberts (1993) pour comparer les fréquences observées et les fréquences caractéristiques des ondes MHD apparaissant dans ce modèle. Le filament est considéré comme un parallélépipède rectangle de densité ρ_o et de température T_o dans un environnement coronal (ρ_e, T_e) et plongé dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ incliné d'un angle ϕ par rapport à l'axe principal du filament. La direction de propagation des ondes est dans un plan parallèle à la photosphère. En utilisant la méthode des modes normaux, nous obtenons les relations de dispersion pour les ondes MHD (ondes d'Alfvén, ondes magnétoacoustiques lentes et rapides). Une analyse paramétrique de ce modèle permet de donner les valeurs approchées des fréquences primaires et secondaires de chaque mode et d'obtenir des propriétés intéressantes concernant les différentes fréquences (rapports des fréquences, classement des fréquences, estimation des fréquences pour des valeurs typiques de la densité et de la température). Nous obtenons alors une méthode d'identification des fréquences observées aux fréquences primaires des modes MHD. Dans le cas de la région active 8725, le mode d'Alfvén pair a une fréquence de 0.25 mHz (65 min), le mode magnétoacoustique rapide "kink" une fréquence de 0.87 mHz (20 min), le mode d'Alfvén impair une fréquence de 1.66 mHz (10 min).

Cette méthode d'identification et l'étude paramétrique du modèle se combinent pour fournir un diagnostic du filament étudié : l'angle ϕ entre l'axe principal du filament et le champ magnétique est estimé à 18° , le module du champ magnétique (en Gauss) est directement proportionnel à la racine carrée de la densité (en cm^{-3}) du filament : $B \sim 2.9 \cdot 10^{-5} \sqrt{\rho_o}$.

Pour confirmer et développer cette étude, nous avons mis en oeuvre un programme d'observation commun aux instruments du satellite SOHO (SUMER, CDS, EIT, MDI) et de l'observatoire au sol THEMIS (DPSM, MTR). Ce programme permet d'étendre l'analyse des oscillations dans les filaments de régions actives à différentes raies spectrales (ou différentes altitudes dans la couronne). De plus, ce programme nous fournit des informations supplémentaires sur l'évolution du champ magnétique et permet également un diagnostic direct du filament et/ou de son environnement. Les résultats préliminaires de ces observations mettent en évidence des fréquences caractéristiques pour la raie HeI à $584 \text{ \AA}$ entre 0.5 et 2 mHz (entre 5 et 30 min), pour la raie MgX à $609 \text{ \AA}$ de 3.73 mHz, et pour la raie H α à $6563 \text{ \AA}$ de 4.16 mHz. De plus, les observations DPSM ont permis de caractériser les mouvements de matière associés à un filament éruptif.

4 Prolongement de ces travaux

Pour l'analyse des oscillations de filaments de régions actives, le programme commun SOHO-THEMIS a fourni un grand nombre de données encore en cours d'analyse. Les observations obtenues concernant le diagnostic direct, l'évolution du champ magnétique ainsi que l'étude des oscillations localisées seront les principaux axes de développement de cette étude. Du point de vue théorique, un effort est aussi à effectuer pour le développement d'un modèle de filament plus réaliste en tenant compte, par exemple, de la gravité ou de la géométrie du champ magnétique. Les développements en cours révèlent les complexités de telles considérations supplémentaires.

La reconstruction du champ magnétique coronal suivant l'hypothèse du champ sans-force non linéaire doit être développée pour un grand nombre de régions actives et à différents instants de l'évolution d'une région active. Ce développement permettrait l'étude de l'évolution temporelle de l'énergie magnétique et de l'hélicité magnétique relative *avant et après* une éruption. L'évolution de différentes structures magnétiques, l'émergence de tubes de flux, ou la configuration magnétique des filaments sont des événements ou des structures très importants pour la compréhension des éruptions solaires ("flares" ou éruption de filaments) et/ou des éjections de masse coronale (CME) que cette méthode de reconstruction est potentiellement capable de nous aider à résoudre. La configuration magnétique obtenue pour un équilibre magnétostatique peut aussi être utilisée comme condition initiale d'un code d'évolution MHD.

Les observations jouent un rôle primordial dans ces futurs développements. Avec le développement des magnétographes vectoriels (THEMIS, Solar B ou Solis), les composantes transverses du champ magnétique seront mieux résolues et permettront d'envisager la reconstruction des structures de champ faible tels que les filaments, les zones de Soleil calme ou les trous coronaux.