

# Chapitre I

## Introduction générale

### *Résumé*

*Afin de préciser le cadre des recherches effectuées lors de la thèse, une description générale du Soleil est nécessaire. Le Soleil peut être séparé en deux parties : l'intérieur du Soleil incluant le noyau, la zone radiative et la zone convective dont l'étude est limitée par l'observation, et l'atmosphère solaire (photosphère, chromosphère, région de transition et couronne) plus accessible aux observations. On insistera particulièrement sur les structures magnétiques de l'atmosphère solaire telles que les régions actives et les filaments-protubérances.*

## 1 Présentation

L'Univers est composé de milliards de galaxies, elles-mêmes composées de milliards d'étoiles. Le Soleil représente simplement une étoile appartenant à la Voie Lactée, notre galaxie (Fig. I.1 à gauche). Autour de cette étoile gravitent neuf planètes (Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton) et une multitude d'astéroïdes et de comètes dont les mouvements sont très bien décrits par les lois de Kepler. Le système solaire constitue pour l'Homme le plus proche laboratoire pour comprendre la structure de l'Univers. La Terre et les Hommes ne pourraient exister sans la présence du Soleil. Cette étoile, foyer de notre système solaire, a facilité le développement et le maintien de la vie sur Terre. En cela, il est important de connaître sa structure, son évolution et son influence sur le climat ou le comportement terrestre.

Le Soleil est défini par des paramètres globaux tels que la masse ( $m_{\odot} = 1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ), la magnitude ( $M_{\odot} = 4.8$ ) définissant le type spectral de l'étoile (type G2 V), le diamètre ( $D_{\odot} = 1.392 \cdot 10^9 \text{ m}$ ), la distance entre le Soleil et la Terre ( $1 \text{ AU} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ ), la température effective ( $T_e = 5785 \text{ K}$ ). Les modèles d'évolution stellaire prédisent que le Soleil, âgé de 4.6 milliards d'années, est approximativement à la moitié de son existence avant d'évoluer vers le stade de naine blanche. Le Soleil est principalement constitué d'hydrogène (90 %) et d'hélium ( $\sim 8\%$ ).

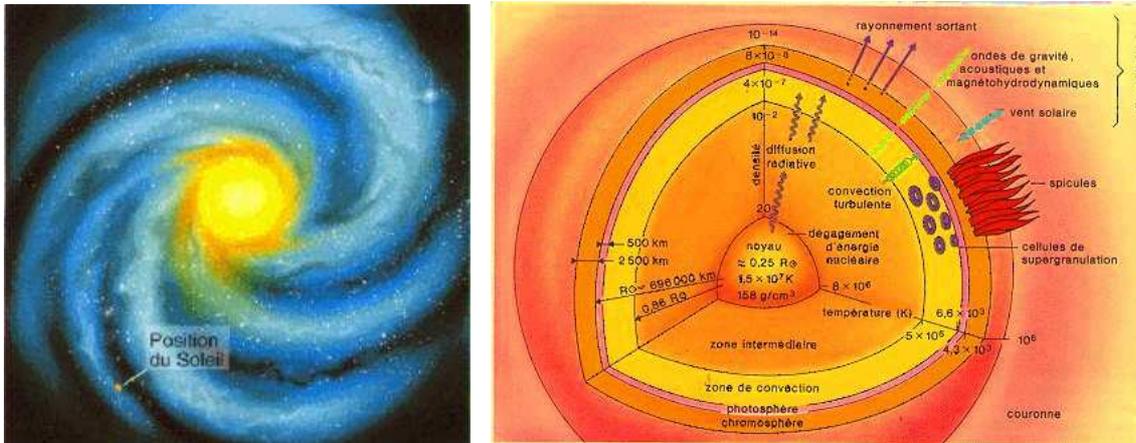


FIG. I.1 – Situation du Soleil dans la Voie Lactée (à gauche) ; structure du Soleil du coeur à la couronne (à droite) : les distances, la température et la densité sont indiquées sur chaque axe du repère.

## 2 La structure interne du Soleil

L'intérieur du Soleil peut être divisé en quatre régions dans lesquelles les processus physiques sont totalement différents : le noyau ou coeur du Soleil, la zone radiative, la tachocline et la zone convective.

## 2.1 Le coeur du Soleil

Le coeur du Soleil est la source d'énergie de l'étoile. Il est le siège de nombreuses réactions thermonucléaires qui transforment l'hydrogène en noyaux d'hélium. Ces réactions produisent de l'énergie qui se retrouvera sous la forme de lumière visible au niveau de la surface. La température au centre du Soleil est de 15 MK et la densité de  $150 \text{ g.cm}^{-3}$ . Les deux décroissent rapidement lorsque l'on s'éloigne du centre. Par exemple à la limite du noyau ( $\sim 175\,000 \text{ km}$  du centre), la température a diminué de moitié et la densité est de  $20 \text{ g.cm}^{-3}$ .

Ces réactions nucléaires créent également des neutrinos qui passent directement à travers les différentes couches de l'intérieur solaire et que l'on peut détecter sur la Terre. Le nombre de neutrinos détecté reste très inférieur au nombre de neutrinos prédit (environ un facteur 3). Le problème de ces neutrinos manquants est encore à l'heure actuelle un des grands mystères de la physique solaire.

## 2.2 La zone radiative

Dans la zone radiative, l'énergie se transporte par collisions électrons-photons (transport radiatif). Ce processus impose aux photons un temps de transport supérieur à  $10^6$  d'années pour sortir de la zone radiative. Cette zone s'étend de  $0.25 R_{\odot}$  à  $0.75 R_{\odot}$  avec une température passant de 7 MK à 2 MK et une densité variant de  $20 \text{ g.cm}^{-3}$  à  $0.2 \text{ g.cm}^{-3}$ . On considère en général que l'ensemble constitué du noyau et de la zone radiative est en rotation rigide autour de l'axe nord-sud.

## 2.3 La tachocline

La tachocline (Spiegel & Zahn, 1992) est l'interface entre la zone radiative et la zone convective. Cette fine couche (estimée à 3000 km) est le siège de phénomènes qui ont motivé les récentes études : la turbulence et/ou la circulation méridionale peuvent expliquer les changements soudains dans la composition chimique entre la zone radiative et la zone convective, et l'effet de dynamo solaire présent au niveau de cette interface permet de caractériser un site de création du champ magnétique (cf revue de Corbard et al., 2000).

## 2.4 La zone convective

La zone convective s'étend de la tachocline à la surface visible du Soleil ( $\sim 200\,000 \text{ km}$ ). La température varie de 2 MK à la base de la zone de convection à 5700 K à la surface. L'existence d'ions lourds (e. g. carbone, oxygène, calcium, fer) rend le milieu plus opaque et les radiations ont plus de difficultés à traverser cette couche. La densité à la surface ( $\sim 2 \cdot 10^{-7} \text{ g.cm}^{-3}$ ) est  $10^6$  fois inférieure à la densité à la base de la zone de convection. Les mouvements convectifs engendrés par ces forts gradients de densité et de température sont observables à la surface solaire comme des granules ou des supergranules.

Le fait que la zone de convection soit opaque rend les observations des couches internes du Soleil impossible. Par contre, il existe des oscillations solaires globales (modes de pression ou de gravité) directement liées à la nature même de l'étoile (profondeur de la

zone de convection, taux de rotation de la zone radiative, ...). L'analyse de ces oscillations globales permet donc de sonder l'intérieur du Soleil : c'est l'héliosismologie.

### 3 L'atmosphère solaire

#### 3.1 La photosphère

La surface visible du Soleil est appelée photosphère. C'est une couche très mince ( $\sim 100$  km) avec une température proche de la température effective du Soleil :  $T_e = 5785$  K. Les principales figures caractéristiques de la photosphère sont les taches solaires, les facules, les granules et les supergranules. Comme nous l'avons déjà évoqué, ces deux dernières structures sont représentatives des cellules de convection (respectivement, avec une largeur  $\sim 1000$  km et de  $\sim 35000$  km). Les taches solaires sont des points noirs sur le Soleil associés à des régions possédant de fortes valeurs du champ magnétique (quelques milliers de Gauss). Le champ magnétique est le plus intense et presque vertical dans l'ombre des taches, et le moins intense et presque entièrement horizontal dans la pénombre. Les taches sont utilisées comme des traceurs de l'activité magnétique. Le nombre de Wolf (nombre de taches et groupes de taches solaires) a permis de mettre en évidence le cycle d'activité magnétique solaire de l'ordre de 11 ans. Ce cycle peut aussi être observé en étudiant les variations en latitude des taches (diagramme papillon).

#### 3.2 La chromosphère

Dans la chromosphère, la densité continue à décroître rapidement alors que la température atteint environ  $20000$  K. La raie  $H\alpha$  à  $6563$  Å est la plus utilisée pour caractériser les figures principales de la chromosphère : les plages, les filaments, les protubérances, les fibrilles, les spicules. Le réseau chromosphérique créé par le champ magnétique est observable dans la raie K du calcium ionisé. Les plages sont des régions brillantes caractérisant les forts champs magnétiques des taches solaires et des polarités magnétiques associées à ces taches. Les protubérances (vues au limbe) ou les filaments (vus sur le disque solaire) sont des structures magnétiques plus denses et plus froides que leur environnement. Ces structures sont principalement observées dans des raies chromosphériques mais le corps de ces structures se situe dans la couronne. Les propriétés des filaments-protubérances sont détaillées dans la section suivante. Les spicules sont de petits jets de matière dirigés de la chromosphère vers la couronne avec une vitesse de l'ordre de  $20 \text{ km.s}^{-1}$ .

#### 3.3 La région de transition

La région de transition est une couche mince (de  $10$  à  $100$  km) et irrégulière séparant la chromosphère et la couronne. Dans cette interface, la température augmente brutalement de  $\sim 20000$  K à  $1$  MK. Les observations mettent en évidence la présence d'un réseau magnétique (voir par exemple Gabriel, 1976). La région de transition est principalement observée dans les raies telles celles du CIV, de l'OIV ou du SiIV. On peut se reporter aux observations du disque entier obtenues par SUMER en 1996.

### 3.4 La couronne

La couronne s'étend depuis la zone de transition jusqu'à plusieurs unités astronomiques. Elle se caractérise par une température élevée ( $> 1$  MK) et une densité faible ( $\sim 10^{-15}$  g.cm $^{-3}$ ). Les structures caractéristiques sont variées par leurs dimensions : les boucles coronales, les sigmoïdes, les trous coronaux, les plumes, les points brillants, les "Helmet Streamers". Les régions actives regroupent des figures photosphériques (taches), chromosphériques (plages, filaments) et coronales (boucles, sigmoïdes). Les boucles coronales et les sigmoïdes sont des lignes de champ magnétique reliant les deux polarités d'une région active. Les "Helmet Streamers" sont des structures magnétiques de grandes dimensions ( $> 2 R_{\odot}$ ) recouvrant une région active. En période de minimum d'activité solaire, les "Helmet Streamers" sont symétriques par rapport à l'équateur. De ces régions provient le vent solaire lent. Les plumes polaires sont des serpentins longs et fins apparaissant aux pôles et associés à des structures magnétiques ouvertes. Les points brillants sont de petits bipôles magnétiques ( $\sim 2''-10''$ ) avec une durée de vie limitée (entre quelques minutes et quelques heures). Ils contribuent au chauffage à micro-échelle de la couronne. Les trous coronaux sont des zones sombres apparaissant aux pôles (parfois sur le disque) et associées à des lignes de champ magnétique ouvertes.

Des événements éruptifs sont souvent associés aux structures coronales. Les éruptions ("flares") correspondant à des embrillancements observés dans la raie H $\alpha$  se produisent dans les régions actives et se caractérisent par une réorganisation du champ magnétique et une modification des structures coronales de la région active. Les éruptions peuvent engendrer des éjections de la matière coronale dans le milieu interplanétaire (CME : éjection de masse coronale). Suivant la direction d'éjection, les particules ainsi libérées interagissent avec l'atmosphère terrestre (aurores boréales, perturbations électrostatiques).

## 4 Les protubérances-filaments

Dans la couronne solaire, il apparaît des structures massives et froides, en comparaison au milieu coronal les environnant, appelées soit protubérances lorsqu'elles sont observées au limbe, soit filaments lorsqu'elles sont sur le disque. Les filaments sont situés le long de la ligne d'inversion de la composante verticale du champ magnétique. Les filaments sont généralement classés en deux catégories principales : les filaments quiescents et actifs. Les filaments quiescents apparaissent comme des structures stables avec une durée de vie pouvant aller jusqu'à plusieurs rotations solaires. Au contraire, les filaments actifs sont liés à des éruptions. Ces filaments sont des structures dynamiques dont les mouvements violents réduisent la durée de vie à quelques heures.

L'intérêt des observateurs s'est depuis longtemps focalisé sur l'étude des filaments quiescents. Les dimensions typiques des filaments sont une longueur de 200 Mm, une hauteur de 50 Mm et une largeur de 10 Mm. Les paramètres caractéristiques du plasma sont les suivants. La température est estimée entre 5 000 et 8 000 K alors que la température de l'environnement coronal est de l'ordre de 1 MK. La densité électronique appartient à l'intervalle  $10^{10}-10^{11}$  cm $^{-3}$ . Le degré d'ionisation, représentant le rapport entre la densité électronique et la densité totale d'hydrogène, est compris entre 1 et 10. Les vitesses ca-

ractéristiques des mouvements de matière dans les filaments peuvent atteindre  $30 \text{ km.s}^{-1}$  (cf revue de Schmieder, 1989). Globalement, les mouvements de matière dans un filament sont ascendants ( $\sim 0.5 \text{ km.s}^{-1}$  pour la raie  $H\alpha$ ). Les mesures du champ magnétique (Leroy et al., 1984) révèlent des valeurs de l'ordre de 8 G. Le champ magnétique est considéré comme étant parallèle à la photosphère. L'angle entre le champ magnétique et la longueur du filament est d'environ  $25^\circ$  caractérisant un cisaillement important. Il existe de nombreuses observations mettant en évidence les structures fines du filament. Les filaments quiescents sont situés dans des régions calmes du Soleil ou dans l'environnement d'une région active où le champ magnétique photosphérique est faible ( $<$  quelques centaines de Gauss). Au cours de son évolution, un filament quiescent peut devenir un filament actif suite à une modification de la distribution du champ magnétique. L'ensemble de ces paramètres du plasma font que le  $\beta$  du plasma (rapport de la pression cinétique et de la pression magnétique) est généralement inférieur à 1. Cela a pour conséquence que le champ magnétique structure le plasma.

Dans les filaments actifs, la densité est généralement plus élevée (jusqu'à  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ) et le champ magnétique est compris entre 20 et 70 G. Ils sont situés dans des régions actives et sont impliqués dans les phénomènes éruptifs tels que les "flares" ou les éruptions de filament. Des signes précurseurs des éruptions associées à des filaments ont été mis en évidence par les observations : le champ magnétique photosphérique est très cisailé à proximité de la ligne d'inversion de la composante verticale du champ magnétique (Martin, 1998), le filament s'élève dans la couronne, ou une polarité parasite apparaît proche du site de l'éruption.

## 5 Plan de la thèse

Dans cette thèse, nous étudions les structures magnétiques solaires afin de déterminer les propriétés et l'évolution du champ magnétique dans les étapes précédant un phénomène éruptif. En particulier, nous nous intéressons à la structure des filaments. Pour ce faire, nous avons envisagé deux aspects distincts : l'extrapolation du champ magnétique photosphérique dans la couronne, et l'analyse des oscillations dans un filament. Chaque aspect nécessite de connaître la structure de la région étudiée à l'aide des observations. Principalement, nous avons utilisé les données fournies par le satellite SOHO et archivées au centre MEDOC (IAS).

Dans le chapitre II, je rappelle brièvement les principales caractéristiques d'un plasma et j'introduis la magnétohydrodynamique (MHD) qui servira de base à tous les calculs développés par la suite. En particulier, j'insiste sur la restriction de la MHD aux équilibres magnéto(hydro)statiques, ainsi que sur l'existence d'ondes MHD dans un plasma magnétisé. Le Chapitre III est dédié à l'étude de la structure magnétique d'une région active. Pour ce faire, nous reconstruisons le champ magnétique coronal en utilisant les observations au niveau photosphérique. Les données magnétiques vectorielles utilisées permettent de tenir compte de courants électriques localisés. Chapitre IV, nous poursuivons l'étude précédente pour identifier la structure et la localisation du filament. En ce qui concerne l'étude des ondes MHD (Chap. V), les observations SUMER/SOHO fournissent

---

des indications observationnelles de l'existence de telles ondes. Et le modèle de Joarder & Roberts (1993) nous permet d'identifier certaines de ces ondes ainsi que de développer une méthode diagnostique du filament. Dans le but de confirmer et de développer cette étude, nous avons défini un programme d'observation commun SOHO-THEMIS (Chap. VI) dédié à l'étude des oscillations dans les filaments de régions actives. Dans le Chapitre VII, je présente le bilan de cette thèse ainsi que les perspectives concernant ces travaux. Il est à noter que l'Annexe A décrit les moyens mis en oeuvre pour observer le Soleil : la mission SOHO, les caractéristiques des campagnes d'observation MEDOC, les instruments impliqués dans nos observations (SUMER, CDS, IVM, MDI, ...).