

## II.1 Introduction

Un plasma est un système statique formé de particules chargées et de particules neutres. L'état plasma est considéré comme étant le quatrième état de la matière, il constitue 99% de notre univers. Dans les plasmas chauds, la pression du gaz est relativement élevée ce qui augmente le nombre des collisions entre les particules (neutre, excitées, non excitées, ionisées) et qui favorise ainsi la transmission de l'énergie. Il en résulte un plasma qui se trouve dans un équilibre thermodynamique, autrement dit, toutes ces particules ont pratiquement la même grande quantité d'énergie, ce qui se traduit par l'appellation 'chaud'.

Historiquement, les premières études sur les plasmas chauds se basaient sur les observations astrophysiques, notamment celles relatives au soleil. Pour tenter d'expliquer l'origine de l'énergie des étoiles et de celle du soleil en particulier, le physicien Allemand Bethe imagina, en 1939, qu'à l'intérieur du soleil, la température dépasse  $10^7$  K et il s'y déroule un ensemble complexe de réactions de fusion de noyaux légers. Quelques années plus tard, on découvrit que la haute atmosphère solaire est également un plasma chaud.

Les étoiles constituent une fraction importante de la masse de l'Univers. Notre galaxie en contient une centaine de milliards. La description du Soleil est un bon moyen pour appréhender l'ensemble des étoiles. En effet, nous connaissons mieux le soleil que n'importe quelle autre étoile. Il est l'étoile la plus proche, la seule qui puisse être observée en détail, au moins en ce qui concerne les couches extérieures, transparentes au rayonnement. Nous connaissons sa masse, sa luminosité, la composition de sa surface et son âge avec une précision incomparablement meilleure que pour toutes les autres étoiles accessibles à nos observations.

Le soleil est une boule de plasma de 1391000 km de diamètre, dont la distance moyenne à la terre est de  $149,45 \times 10^6$  km, son âge moyen est évalué à 4,5 milliards d'années. Il existe des étoiles beaucoup plus massives que le Soleil: certaines peuvent avoir des masses cent fois supérieures. Les étoiles les moins massives susceptibles d'être observées actuellement ont une masse d'environ 0,1 de la masse solaire.

Les étoiles se forment à partir des nuages interstellaires denses. La composition chimique de la matière solaire peut être déterminée, au moins dans l'atmosphère, par l'étude des raies spectrales émises. Les abondances relatives indiquent environ 71 % d'hydrogène, 27 % d'hélium, et des quantités très faibles (2 %) des autres éléments plus lourds (C, N, O, ...), quantités pourtant essentielles à l'étude des propriétés physiques du milieu (températures, densités) souvent déduites des spectres de raies.

Tant à l'intérieur du soleil que dans son atmosphère, la détermination des deux paramètres physiques que sont la température et la densité électronique est d'une importance capitale pour mieux cerner les phénomènes physiques qui s'y produisent. Ces paramètres varient progressivement à mesure que l'on se déplace successivement à travers les zones radiales dont est constitué le soleil [17].

## II.2 Structure interne du soleil

L'intérieur du soleil n'est pas observable directement, mais il est possible d'en obtenir une représentation approchée grâce aux modèles qui ont été construits à partir des lois de la physique, et qui tiennent compte de toutes ses propriétés connues. Du centre jusqu'à la surface, trois zones successives peuvent y être distinguées :

- Un noyau, dont le rayon est de l'ordre de 200 000 km (30 % du rayon solaire) et dans lequel se produisent les réactions thermonucléaires. Au centre lui même, la pression serait de 220 milliards d'atmosphères, la température de 14,62 million de degrés et la densité de  $135 \text{ g/cm}^3$ . A la périphérie de ce noyau, la température est de l'ordre de 7 millions de degrés et la densité de  $14 \text{ g/cm}^3$ .
- Une couche intermédiaire, qui n'est plus assez chaude pour que les réactions nucléaires puissent se produire, et dans laquelle l'énergie est véhiculée vers l'extérieur par radiation (zone radiative). Son rayon extérieur est de l'ordre de 450 000 km, la température et la densité y décroissent respectivement jusqu'à 2 millions de degrés et  $0.15 \text{ g/cm}^3$ .
- Une couche extérieure, dont l'épaisseur pourrait être de l'ordre de 200 000 km environ, et dans laquelle le gradient de température est assez élevé pour que la matière qui s'y trouve soit brassée par des courants de convection de grande amplitude qui jouent un grand rôle dans le transfert de l'énergie vers l'extérieur. Cette convection se manifeste jusqu'à proximité de la surface : d'une part, la granulation de la base de la photosphère en est une manifestation; d'autre part, elle fait apparaître à la surface du soleil une circulation méridienne dont la vitesse moyenne est de 30 à 100 m/s.

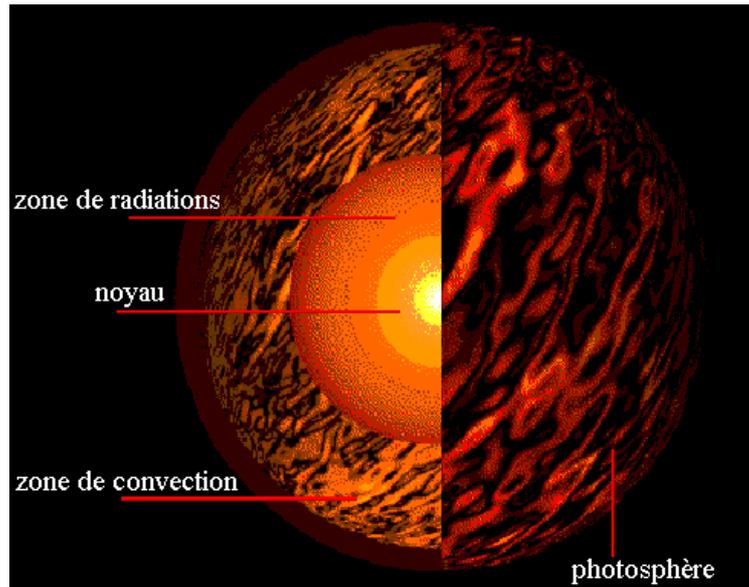


Figure II-1 : Construction physique du soleil

### II.3 Atmosphère solaire

C'est la partie du soleil qui est directement accessible à l'observation, elle a été l'objet de nombreuses découvertes de spectroscopie. Elle demeure encore un vaste champ d'études pour les phénomènes de transfert du rayonnement, d'équilibre statistique et de magnétohydrodynamique.

Il est d'usage de distinguer trois couches dans les régions observables. La plus profonde, ou photosphère, est la fine couche, visible en lumière blanche, d'environ 300 km d'épaisseur, d'où nous provient la quasi-totalité du rayonnement. La chromosphère est la couche, d'une épaisseur de 1500 km, située immédiatement à l'extérieur et visible à l'œil nu durant les éclipses totales sous la forme d'une frange rosée. Enfin la couronne, visible également au cours des éclipses totales sous la forme d'une auréole blanche peu brillante, constitue l'ensemble des couches extérieures de l'atmosphère jusqu'à des distances de plusieurs dizaines de rayons solaires.

#### • Photosphère

L'énergie rayonnée par le soleil dans l'espace interstellaire est emportée presque entièrement par les photons émis au niveau de la photosphère. Cette dernière, comme son nom l'indique, la couche la plus extérieure de la sphère solaire, celle qui limite le disque apparent de l'astre du jour. Elle forme également la couche la plus basse de l'atmosphère du

soleil, dans laquelle l'opacité et la densité diminuent très rapidement avec l'altitude géométrique, ce qui explique que le bord du soleil apparaît bien net.

La photosphère a une apparence irrégulière et tachetée : c'est la granulation solaire, provoquée par la turbulence de la partie supérieure de la zone de convection, située juste en dessous de la photosphère. Chaque granule a une largeur d'environ 2000 km. Bien que la granulation soit permanente, certaines granules ont une durée de vie limitée à 10 minutes. Il existe également des formations de convection de plus grande envergure, causées par la turbulence dans les profondeurs de la zone de convection : ce sont les super granules, dont la largeur est de 30 000 km en moyenne, leur durée de vie pouvant atteindre quelques dizaines d'heures. Les taches solaires sont des régions plus froides, et sont les sièges de champs magnétiques intenses qui peuvent atteindre en général la valeur considérable de 0.25 T (1000 fois le champ magnétique terrestre). Le champ magnétique solaire est essentiellement localisé en dehors des taches. L'ordre de grandeur de la température n'y est plus que de quelques milliers de degrés, décroissant très rapidement dans l'épaisseur de la couche jusqu'à une température dite « de surface » de l'ordre de 4200 K. La pression dans la photosphère est de 1/100 atm.

### • Chromosphère

Les observations lors d'éclipses indiquent qu'immédiatement au-dessus de la photosphère existe une région à densité très faible, la chromosphère, dont la température, à l'inverse de celle de la photosphère, croît avec l'altitude. Un mécanisme de chauffage, probablement par dissipation d'ondes, permet d'expliquer cette remontée de la température. Le minimum de température, situé entre la photosphère et la chromosphère, est observé en infrarouge et en ultraviolet, et correspond à environ 4 300 K. Elle est le siège d'importants jets de matière, les spicules, structures verticales d'un diamètre de l'ordre de 1 000 km, projetées à des altitudes comprises entre 6000 et 10000 km en quelques minutes. Les régions proches des taches solaires sont appelées régions actives, elles sont le siège d'éruptions solaires, violentes explosions provoquées par la libération très rapide d'énergie stockée sous forme magnétique. Les éruptions solaires s'accompagnent entre autres de modifications du champ magnétique, et surtout de la libération de particules très énergétiques.

### • Transition chromosphère-couronne

Alors que les gradients verticaux de température dans les régions interspiculaires de la chromosphère sont de l'ordre de 10 K par kilomètre, ils deviennent brusquement cent fois

plus grands à 2 000 km d'altitude. C'est là, en effet, que l'influence de la couronne commence à être sensible, un flux conducteur important chauffant toute la région de transition chromosphère-couronne. Cette partie de l'atmosphère solaire est difficilement observable dans le domaine visible, car les raies du spectre d'éclipse s'affaiblissent quand la température croît et que la densité diminue.

Les modèles de la zone de transition proviennent principalement des observations de raies ultraviolettes et du continuum radioélectrique. L'intensité de ce dernier indique des températures s'échelonnant de 10 000 K à 2 centimètres de longueur d'onde, à près d'un million de kelvins pour une longueur d'onde de 1,5 m. De même, les raies ultraviolettes proviennent d'éléments peu ionisés présents dans la chromosphère, tel le silicium une fois ionisé (Si II), et d'atomes fortement ionisés se trouvant près de la couronne, tel le silicium neuf fois ionisé (Si X), les différents états intermédiaires étant successivement présents. Les spicules traversent toute cette région de transition, atteignant la base de la couronne à des altitudes de 10 000 à 15 000 km.

### • Couronne

L'étude de la couronne s'est effectuée, pendant de nombreuses années, lors d'éclipses ou à l'aide d'un instrument, le coronographe, créant une éclipse artificielle de la photosphère. Pourtant, en 1973, les images en rayons X obtenues à partir de la station orbitale habitée Skylab ont profondément modifié l'approche que l'on pouvait avoir de la physique coronale, car, contrairement aux observations précédemment citées, ces images montraient l'aspect de la couronne sur le disque et non plus seulement au-dessus du bord. Sur ces images en rayons X, ainsi que sur celles qui ont été obtenues ultérieurement à partir de fusées-sondes ou de satellites, la couronne apparaît en grande partie formée d'arches. Ces arches étant dominées par le champ magnétique d'une région active solaire ou même reliant deux régions actives entre elles.

Dans d'autres régions, où le champ magnétique est ouvert sur le milieu interplanétaire, on a observé en rayons X des trous coronaux dont les propriétés physiques diffèrent notablement de celles des arches. Les trous coronaux occupent les pôles du Soleil en permanence, et ils peuvent s'étendre vers les latitudes les plus basses. Ils sont moins denses et moins chauds (800 000 K) que les arches, dont la température est de 1,5 à 2 millions de kelvins. Cela explique leur émissivité moindre en rayons X.

Le chauffage de la couronne reste encore un problème ouvert. Pendant de nombreuses années, la couronne étant considérée comme relativement homogène, le

mécanisme le plus probable semblait être un chauffage par dissipation des ondes de choc acoustiques créées, sous la photosphère, par la turbulence de la zone convective. Des observations et des calculs théoriques ont montré pourtant que ces ondes n'avaient aucune chance d'atteindre la couronne. Depuis la découverte des arches coronales, d'autres mécanismes ont été proposés, qui font appel soit à la dissipation d'ondes ayant pour support le champ magnétique des arches, soit au dépôt d'énergie liée à l'évolution du champ magnétique lui-même ou à la dissipation de courants électriques.

D'autres structures coronales, connues, quant à elles, depuis le Moyen Age grâce aux observations d'éclipses, sont des régions plus froides et plus denses que la couronne environnante: il s'agit des protubérances. Leur spectre est, de fait, proche de celui de la chromosphère. Les protubérances ont la forme de lames verticales de quelques milliers de kilomètres d'épaisseur, dont la longueur peut atteindre un demi-rayon solaire lorsqu'elles sont proches des pôles. Leur hauteur est de l'ordre de 50 000 km. Les protubérances peuvent durer quelques semaines, mais elles sont quelque fois perturbées et oscillent. Elles peuvent alors disparaître brusquement pour se reformer plus tard au même endroit. Elles sont fondamentalement liées à la présence de configurations magnétiques bien spécifiques, qui expliquent leur stabilité et les isolent thermiquement de la couronne.

Au-dessus des protubérances, des jets coronaux, structures magnétiques ouvertes, à température coronale, mais dix fois plus denses que la couronne moyenne, peuvent être suivis au-delà de dix rayons solaires de la surface. La couronne proprement dite cède la place, à grande altitude, au vent solaire par accélération de la matière jusqu'à des vitesses de 300 à 700 kilomètres par seconde.

## **II.4 Activité solaire**

### **II.4.1 Régions actives :**

Les taches solaires sont la manifestation la plus évidente de l'activité du Soleil. Certaines, visibles à l'œil nu, ont été observées depuis fort longtemps, mais c'est l'invention du télescope, au début du XVII<sup>e</sup> siècle, qui en a permis l'étude systématique. Dès cette époque, Galilée, Johann Fabricius et Christoph Scheiner ont découvert la rotation du Soleil. Les taches ne sont pas réparties uniformément sur le Soleil: elles sont généralement situées de part et d'autre de l'équateur solaire, entre les latitudes 30° nord et sud. L'observation de taches situées à différentes latitudes montre que le Soleil a une période de rotation de

27,1 jours à  $10^\circ$  de l'équateur et de 28,5 jours à  $30^\circ$ . Cette rotation différentielle est un phénomène global d'une grande importance pour la compréhension de l'activité solaire.

La partie centrale des taches (l'ombre) est moins lumineuse que le reste de la photosphère car elle est moins dense et plus froide (4 200 K) que l'atmosphère normale (5 800 K). La pénombre qui entoure l'ombre est une région de transition dont la température n'est inférieure que de 300 à 500 K à celle de la photosphère. Les différences de conditions physiques entre la tache et la photosphère normale sont dues à des champs magnétiques très forts (plusieurs dixièmes de Tesla) qui bloquent le transport convectif de l'énergie dans les régions su photosphériques.

Les taches ne sont pas isolées. Elles sont l'une des composantes des régions actives, qui peuvent posséder un grand nombre de taches et de protubérances. Des facules, plages brillantes bien visibles au niveau chromosphérique, sont aussi observées dans les régions actives. Les régions actives sont en évolution permanente, naissant et disparaissant à l'échelle de quelques jours ou de quelques mois. Apparaissant d'abord sous forme de petits pores sombres, les taches peuvent ne jamais se développer complètement: c'est le cas des régions actives éphémères, petites régions bipolaires bien visibles sur les images en rayons X, où elles sont vues sous forme de points brillants qui couvrent l'ensemble du Soleil, y compris les zones proches du pôle, contrairement aux taches plus grandes. Les taches sont dues à l'émergence, au niveau de la photosphère, de boucles de champ magnétique transportées par la convection. C'est l'apparition de nouveaux tubes de champ ou au contraire la dispersion des structures existantes, qui détermine l'évolution de la région active. La rotation différentielle joue, à cet égard, un rôle destructeur, en dispersant lentement, après la disparition des taches, les facules et les protubérances restantes.

#### II.4.2 Phénomènes éruptifs

Les éruptions dans une région active correspondent à la libération brusque (en quelques minutes) d'une énergie importante (jusqu'à  $10^{25}$  joules). Cette libération d'énergie donne lieu à l'échauffement du plasma ( $10^8$  K) et à l'accélération de particules (électrons, protons, ions). On détecte alors des émissions intenses dans tout le domaine spectral, depuis les rayons X jusqu'aux ondes radioélectriques. Certaines éruptions particulièrement intenses donnent également lieu à des émissions de rayons gamma (0,1 nm) par interaction des noyaux accélérés avec les couches de la basse atmosphère solaire. Electrons et protons accélérés peuvent s'échapper de l'atmosphère solaire et être détectés dans le milieu interplanétaire. Des éjections de matière coronale (les transitoires coronaux ou CME, pour coronal mass ejections)

accompagnent souvent les éruptions mais peuvent aussi être déclenchées par des filaments déstabilisés.

Des observations en rayons X effectuées par le satellite japonais Yohkoh, lancé en 1991, ont montré que le champ magnétique d'une grande partie de la couronne peut se restructurer différemment au cours de ces phénomènes. Des ondes de choc sont souvent observées dans le milieu interplanétaire en association avec les transitoires coronaux.

Les centres les plus actifs sont ceux dont la complexité magnétique est grande, et l'on dispose, par l'observation des taches (en particulier lorsqu'une nouvelle polarité apparaît aux abords de la tache), de méthodes de prévision d'une éruption imminente de grande ampleur. Mais, à côté des événements spectaculaires venant perturber l'atmosphère terrestre, existent un grand nombre d'éruptions très faibles qui d'ailleurs échappent souvent à l'observation. Les petites régions actives éphémères sont elles-mêmes le siège d'éruptions. Une éruption est un phénomène complexe, à la fois dans sa géométrie et dans sa séquence temporelle. Pour tenter de comprendre son mécanisme, on doit observer toutes les longueurs d'onde simultanément, avec une bonne résolution temporelle et spatiale. Cela a été possible à partir de 1980 par la conjonction de mesures au sol en optique et en radioastronomie, et grâce au lancement d'un satellite de la N.A.S.A. (S.M.M.: Solar Maximum Mission) spécialement conçu pour l'étude des éruptions. Si le détail des processus ayant lieu dans l'éruption est encore mal connu, l'accord est général sur l'origine magnétique de l'énergie libérée pendant l'éruption. On pense souvent que les structures magnétiques de la région où l'éruption a lieu ont été déformées au cours de l'évolution de la région active, emmagasinant ainsi de l'énergie qui peut être libérée par retour du champ magnétique vers une configuration plus simple.

### II.4.3 Cycle solaire

L'activité solaire n'est pas constante au cours du temps. On observe en moyenne la présence d'un grand nombre de centres actifs durant des périodes se répétant tous les onze ans. La montée de chaque cycle, qui dure quatre ans et demi, est nettement plus rapide que sa descente (six ans et demi). La périodicité est en réalité de vingt-deux ans: l'ordre des polarités des taches appartenant à un groupe bipolaire, qui reste, pour chaque hémisphère (Nord ou Sud) du Soleil, identique pendant onze ans, s'inverse au cycle suivant. L'étude de la position des taches indique par ailleurs que la latitude d'apparition des centres actifs, de 30 degrés environ au début du cycle de onze ans, décroît ensuite et n'est en moyenne que de l'ordre de 10 degrés en fin de cycle. Simultanément, les taches liées au cycle suivant commencent à apparaître à plus haute latitude.