Le Soleil

1 Le soleil

1.1 Présentation générale

Le Soleil est une étoile banale pour l'univers et même pour notre galaxie, mais forcément singulière à nos yeux de terriens. Il a inspiré à la fois respect, vénération, crainte et curiosité depuis les temps les plus reculés. L'étude du soleil a considérablement bénéficié des progrès très rapides des techniques d'observation. Les satellites ont notamment permis d'élargir le domaine du spectre solaire observé, ajoutant les rayons γ et X, l'ultraviolet et l'infrarouge lointain aux longueurs d'onde observables au sol à l'aide de télescopes optiques et d'instruments de radioastronomie. Le Soleil a déjà vécu la moitié de sa vie ; dans quelques 5 milliards d'années, après être passé par différentes phases, son coeur se refroidira progressivement et il deviendra un corps sombre et inerte. Cela laisse encore de belles années à venir aux astrophysiciens solaires pour approfondir la connaissance que nous avons de cet objet si particulier et des différents phénomènes dont il est le siège.

Rayon	$6.9598 \times 10^8 m$
Masse	$1.989 \times 10^{30} kg$
Age	$4.55 \times 10^9 ans$
Volume	$1.412 \times 10^{27} m^3$
Densité moyenne	$1.409 \times 10^3 kg.m^{-3}$
Température au centre	$1.557 \times 10^7 K$
Température de la photosphère	$5\,780 K$
Température de la couronne	$2.3 \times 10^6 K$
Distance moyenne à la Terre	$1.4959787 \times 10^{11} m$

Tab. 2.1: Données numériques de référence sur le Soleil

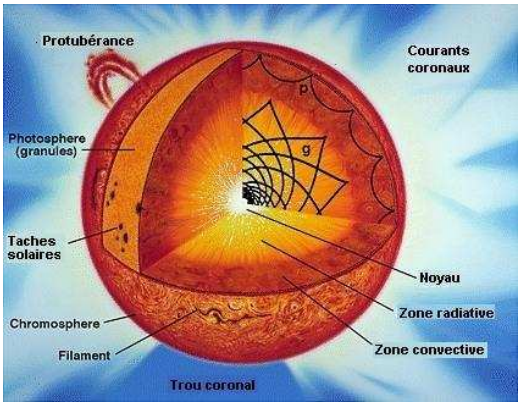

Fig. 2.1: Schéma de la structure intérieure du soleil.

1.2 L'étoile Soleil

1.2.1 La structure interne du Soleil

L'intérieur du Soleil étant inaccessible à l'observation directe, il faut recourir à des constructions théoriques à partir des observations héliosismologiques pour décrire les phénomènes qui s'y produisent et déterminer sa structure interne. Ces études ont mis en évidence que l'intérieur du Soleil est divisé en trois zones : le noyau, la zone radiative et la zone convective.

Le coeur est la partie dans laquelle pratiquement toute l'énergie lumineuse du Soleil est créée grâce à des réactions nucléaires. La température y est extrêmement élevée, environ 15 millions de kelvins. Cette région représente environ 25% du rayon solaire et, du fait de sa grande densité, contient près de 60% de la masse totale de notre étoile. Chaque seconde, 600 millions de tonnes d'hydrogène y sont consommés pour être transformés en hélium, une fraction de cette masse (5 millions de tonnes) est convertie en énergie sous forme de rayons γ. Les photons γ quittant le coeur et se dirigeant vers la surface subissent dans la zone radiative puis la zone convective différentes absorptions et réémissions qui les transforment en rayons X, EUV, UV et visibles.

1.2.2 L'atmosphère solaire

L'atmosphère solaire est composée de trois couches successives : la photosphère, la chromosphère, la couronne, les deux dernières étant séparées par une région de transition. L'observation de l'atmosphère solaire est accessible à tous : la photosphère est visible à l'oeil nu (mais protégé) c'est le disque solaire, la couronne est visible lors des éclipses de Soleil (voir figure 2.2).

La photosphère La photosphère est une couche très mince du Soleil, elle s'étend sur moins d'un millième du rayon solaire. La densité y décroit très rapidement, les couches les plus externes deviennent transparentes, c'est pourquoi la photosphère est communément appelée la surface visible du Soleil. Les principaux phénomènes solaires observables au niveau de la photosphère sont la granulation, la supergranulation, les facules et les taches solaires. Les taches solaires sont des zones plus sombres de la photosphère associées à des régions affichant de fortes valeurs du champ magnétique. Le champ est le

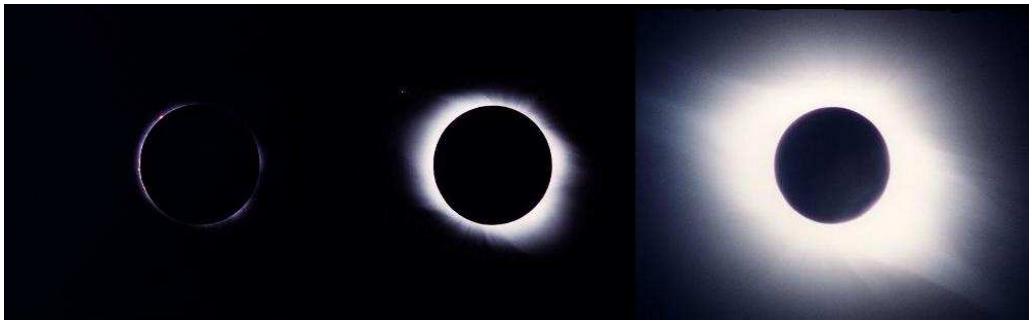

Fig. 2.2: Eclipse totale de Soleil 1998 en Guadeloupe. De gauche à droite : chromosphère, couronne interne et couronne externe (Association Adagio, Société Astronomique de France, Observatoire de Paris).

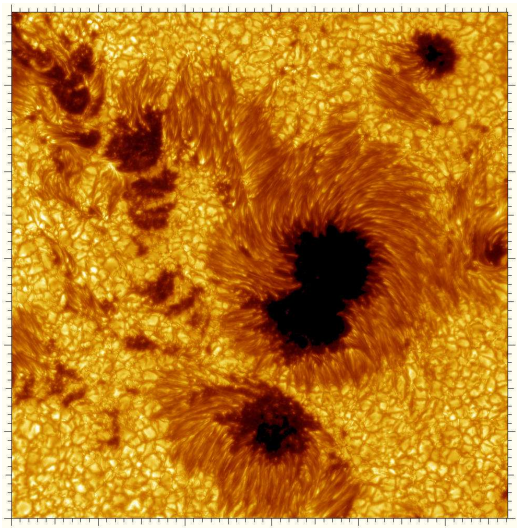

Fig. 2.3: Un groupe de taches solaires dans la région active 10030 observée le 15 Juillet 2002 avec le Swedish 1 meter Solar Telescope à La Palma (Royal Swedish Academy of Sciences).

plus intense (pouvant dépasser 3000 Gauss) et presque orthogonal à la surface dans l'ombre (partie la plus sombre), et moins intense et quasiment parallèle à la surface dans la pénombre (zone périphérique à la tache, moins sombre). Ces taches sont un marqueur de l'activité magnétique du soleil et ont été observées et comptabilisées depuis presque deux siècles. Ces observations ont permis de découvrir que l'activité magnétique du Soleil est cyclique, chaque cycle s'étendant sur 11 ans.

La chromosphère La chromosphère est une couche mince de l'atmosphère solaire (quelques milliers de km), la température y croit de 4000K à environ 10 000K. La chromosphère tire son nom des observations faites depuis le sol : lors d'éclipses totales de Soleil, elle se présente comme un anneau rougeâtre au dessus du bord lunaire. La chromosphère est en grande partie transparente dans le visible mais émet dans l'infrarouge lointain, le domaine millimétrique et l'ultraviolet. Les structures chromosphériques les plus caractéristiques sont les protubérances et les filaments ainsi que le réseau chromosphérique. Les protubérances et filaments sont en fait une même structure ; la protubérance est

vue en émission hors limbe, et le filament est lui observé sur le disque en absorption. Cette structure est une masse de plasma plus dense et plus froid que le milieu coronal environnant apparaissant suspendu par le champ magnétique au-dessus de la photosphère. Le réseau chromosphérique créé par le champ magnétique est principalement observé dans la raie K du calcium ionisé à 393 nm.

La région de transition Juste au-dessus de la chromosphère se trouve une couche très fine de l'atmosphère solaire dans laquelle la température augmente de 20 000K à plus de 2×10^6 K en quelques centaines de kilomètres seulement. A ces températures extrèmes, la lumière émise par le Soleil est dominée par les ions lourds comme CIV, OV, et SiIV. Ces ions émettent dans la partie UV du spectre solaire ce qui rend cette région observable uniquement depuis l'espace, notamment par le spectromètre SUMER à bord de SOHO. Les processus qui conduisent à cette augmentation brutale de température sont toujours une des interrogations principales de la physique solaire.

La couronne La couronne s'étend de la région de transition jusqu'à plusieurs unités astronomiques. Cette région est caractérisée par une faible densité (environ $10^{-15} g.cm^{-3}$), et de très fortes températures (supérieures à 10^6 K). La forme des structures coronales est régie par le champ magnétique solaire, la matière ionisée suit les lignes de champ et forme notamment les jets coronaux qui coiffent les régions actives. Les régions actives se développent de la photosphère à la couronne, au-dessus et autour des taches solaires, lorsque de forts champs magnétiques émergent de l'intérieur du Soleil. Les régions actives regroupent des structures photosphériques (taches), chromosphériques (plages, filaments) et coronales (protubérances, sigmoïdes). Ces régions sont le lieu d'intenses explosions (“ solar flares ”), qui peuvent être observées dans le domaine X. Ces évènements éruptifs se caractérisent par une réorganisation de la structure magnétique et peuvent engendrer des éjections de matière coronale dans le milieu interplanétaire (CME). Les trous coronaux sont d'autres structures caractéristiques de la couronne. Ce sont des régions de la couronne dont la densité et la température sont plus faibles, le champ magnétique y est faible et les lignes de champs sont radiales et ouvertes. Alors que les régions actives apparaissent brillantes dans le spectre UV et X, les trous coronaux sont des régions sombres.

1.3 Le spectre solaire

En 1672, Newton décompose la lumière solaire à l'aide d'un prisme et obtient ainsi le premier spectre solaire visible de l'histoire. Puis au début du XIX^{e}siècle Fraunhofer a l'idée d'utiliser une fente avant le prisme, ce qui lui permet d'observer des raies sombres et fines dans le spectre continu du soleil. Bunsen et Kirchhoff ont ensuite identifié ces raies comme étant des raies d'absorption des éléments présents au dessus de la photosphère. L'étude du spectre solaire permet d'identifier les éléments présents dans le Soleil et d'étudier leurs caractéristiques. Ainsi, la position d'une raie dans le spectre permet de déterminer la nature de l'élement, l'intensité de la raie permet de déduire la température, la pression et la gravité du milieu ou il se trouve, le déplacement de cette raie donne la vitesse de ce milieu et enfin la mesure de l'intensité et de la largeur de la raie permet d'obtenir l'abondance de l'élément. Cette étude a montré dès le début du XX^{e}siècle que l'élément le plus abondant est l'hydrogène, qui représente 92.1% du nombre d'atomes dans le Soleil et 70.68% de la masse totale du Soleil. C'est également grâce à l'étude des raies d'absorption que l'hélium (deuxième élément le plus abondant) a été découvert en 1868, cet élément ne sera trouvé sur Terre qu'en 1895. Seul le spectre visible est observable sur

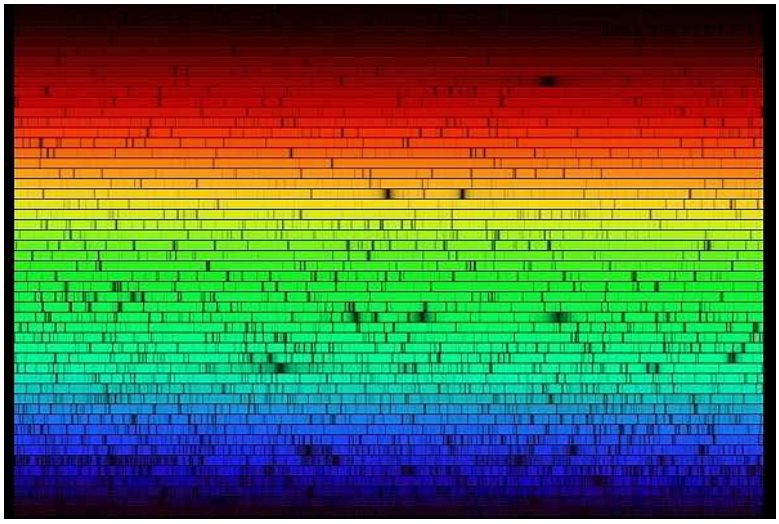

Fig. 2.4: Le spectre solaire visible de 400 nm à 800 nm (N.A.Sharp/ NOAO / NSO / Kitt Peak FTS / AURA / NSF)

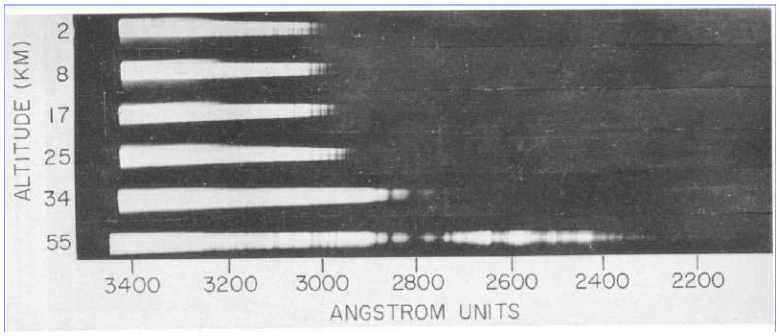

Fig. 2.5: Premier spectre solaire UV enregistré en 1946 ([Tousey et al., 1947]).

Terre (voir figure 2.4), les UV étant absorbés par l'atmosphère ; il a donc fallu attendre 1946 et les premiers vols fusée pour obtenir des spectres UV pris à très hautes altitudes atmosphériques. La figure 2.5 montre l'évolution du spectre solaire UV avec l'altitude dans l'atmosphère terrestre. Ces mesures montrent la nécessité d'aller dans l'espace pour effectuer des mesures aux courtes longueurs d'onde, afin que celles ci ne soient pas absorbées ou contaminées par l'emission terrestre. Depuis ces premières mesures dans l'UV, d'autres ont été faites en rayons X et γ et dans le domaine infrarouge.

Chapitre 3

Besoins de la physique solaire en spectroscopie et imagerie UV

1 Introduction

L'observation du Soleil dans le domaine des longueurs d'onde ultraviolettes est indispensable à la compréhension de divers phénomènes physiques dont le Soleil est le siège. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, le Soleil est composé majoritairement d'hydrogène et d'hélium, or les principales transitions spectrales de résonance de ces éléments ont lieu en dessous de 200 nm. D'autre part, en raison de la température qui y règne, le rayonnement produit par la chromosphère et la couronne est principalement ultraviolet et X. L'observation du Soleil dans l'UV est très récente, puisqu'elle n'est possible que depuis l'espace. Les premiers spectres ont été enregistrés après la seconde guerre mondiale, et les premières images datent de la fin des années 60. Ce domaine de la physique solaire a évolué au rythme des progrès techniques, notamment en matière de détecteurs et de matériaux. Comme nous le détaillerons dans la suite de ce chapitre, les premières données UV ont été enregistrées sur film (voir figure 3.1), puis à l'aide de cellules ou de photomultiplicateurs (tubes photocathodes, tubes CsTe), et enfin grâce aux détecteurs CCD précédés ou non de systèmes intensificateurs. De la même façon, le nombre d'éléments de détection a augmenté faisant progresser les capacités de résolution spatiale de 30" en 1959 [Purcell et al., 1959] à 0.33" en 2002 [Vourlidas et al., 2001b].

Parmi la forêt de raies spectrales et de continus qu'est le spectre solaire UV, nous nous intéresserons plus particulièrement à la raie α de la série de Lyman pour l'hydrogène (dans la suite du manuscrit nous appellerons cette raie H-Lyman α). Cette raie est la plus intense formée dans la chromosphère ; son spectre d'intensité a été enregistré sur film pour la première fois par Richard Tousey en 1962 ([Tousey, 1963]). Cette raie est la source principale de pertes radiatives dans la partie supérieure de la chromosphère et sa connaissance est primordiale pour les modèles de transfert radiatif de l'atmosphère. L'étude du profil de la raie H-Lyman α permet d'obtenir des informations sur l'opacité, la température et les vitesses dans le milieu comme c'est également le cas pour d'autres raies spectrales. Cette raie est optiquement très épaisse, son profil présente un sommet inversé et cette particularité rend son étude particulièrement intéressante. Les différences d'aspect du profil de la H-Lyman α (largeur et profondeur du sommet inversé, assymétrie entre les deux pics ...) suivant les structures où il est enregistré permet d'affiner les modèles de formation de celles-ci ([Gouttebroze et al., 1978] et [Basri et al., 1979]).

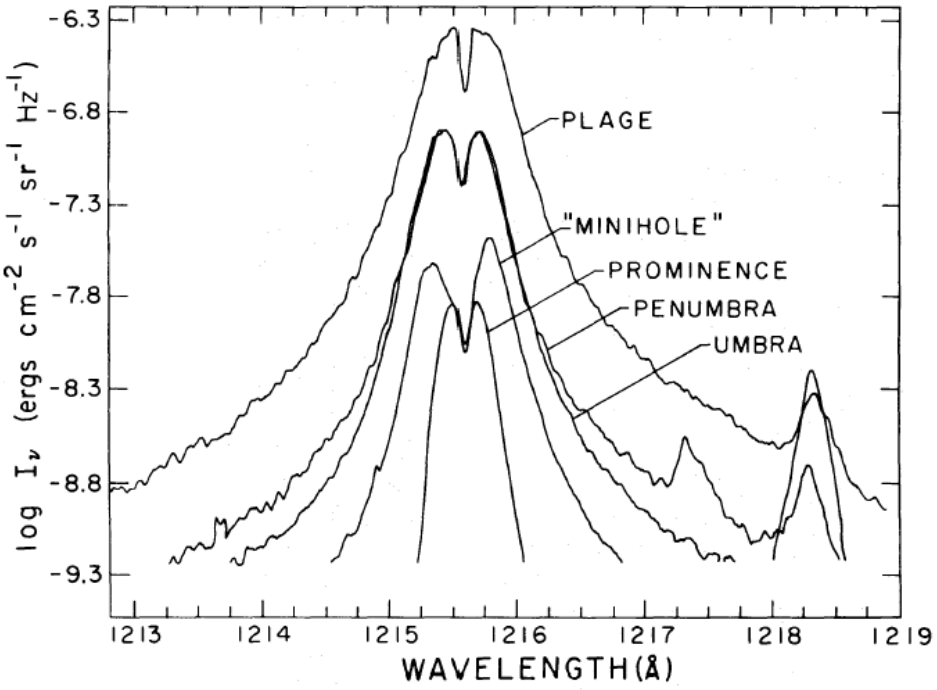

Fig. 3.1: Profils de la raie H-Lyman α enregistrés sur différentes structures au cours du premier vol fusée de l'instrument HRTS en 1975, spectre enregistré sur film photographique puis scanné par un microdensitomètre ([Basri et al., 1979]).

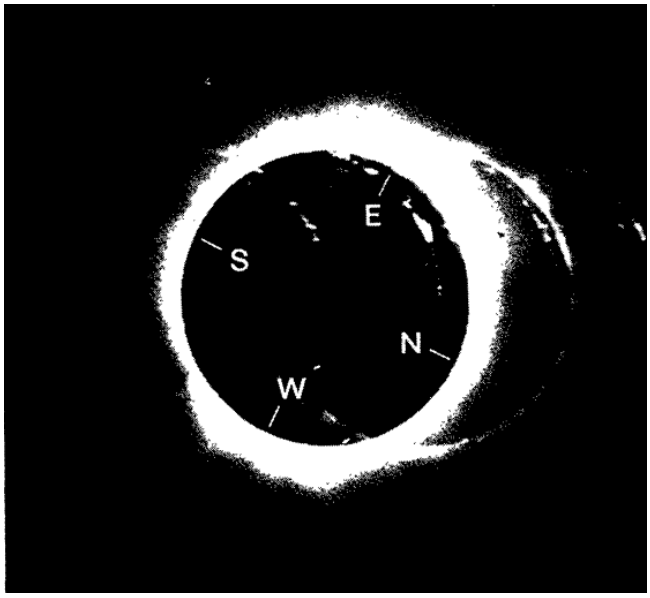

Fig. 3.2: Couronne solaire dans la raie H-Lyman α observée au cours de l'éclipse totale du 7 mars 1970. On peut apercevoir les images de la couronne dans les raies N V (123.8 nm) et Fe XII (124.2 nm) ([Gabriel, 1971]).

L'étude du profil de la raie intégré sur tout le disque solaire est également très utile pour la physique du milieu interplanétaire. En effet, l'observation de l'émission Lyman α à la limite de l'héliosphère permet d'étudier la distribution de l'hydrogène à grande distance du soleil, donnant ainsi des indices sur la nature et la position de l'héliopause. Or cette émission Lyman α interplanétaire est due a la diffusion résonante des photons solaires au centre de la raie H-Lyman α par les atomes d'hydrogène dans le milieu interplanétaire ([Quemerais et al., 1996]), et des travaux récents ([Emerich et al., 2005]) ont permis d'établir une relation entre l'éclairement total du flux H-Lyman α et l'éclairement spectral au centre de la raie, grâce à des mesures non affectées par la géocouronne.

2 Imagerie dans la raie H Lyman α

2.1 Premières images à haute résolution (1970)

Les premières images de la couronne solaire dans la raie H-Lyman α ont été obtenues au cours d'une éclipse totale de Soleil le 7 mars 1970 (voir figure 3.2). L'instrumentation embarquée sur la fusée Aerobee était constituée de deux spectrographes sans fente de type Wadsworth couvrant les deux bandes spectrales 85 nm-219 nm et 185 nm-315 nm ([Gabriel et al., 1971]). Les mesures dans la raie H-Lyman α ont permis d'améliorer la compréhension des processus d'excitation de l'hydrogène de la couronne par la diffusion résonnante du H-Lyman α chromosphérique ([Gabriel, 1971]). Le calcul des densités d'électron et les températures notamment dans une région active et une région calme à partir des observations dans des raies interdites du domaine spectral 100 nm - 220 nm ont conduit à une meilleure connaissance de la structure de ces régions ([Gabriel and Jordan, 1975]). Peu après, les premières images à haute résolution spatiale du disque solaire dans la raie H-Lyman α ont été

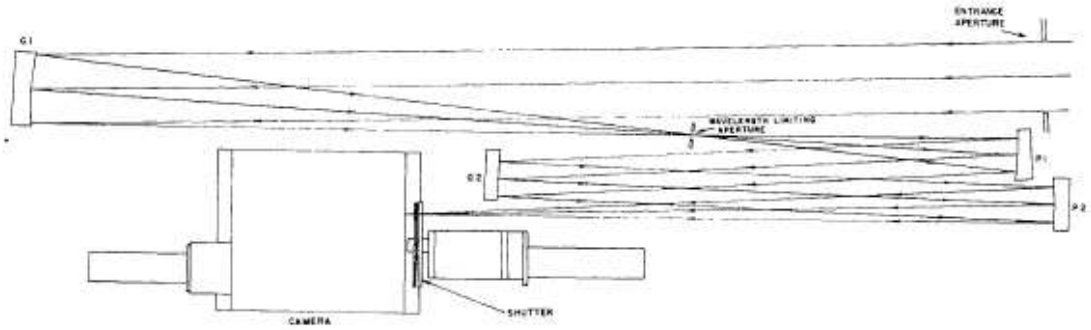

Fig. 3.3: Schéma optique du spectrohéliographe utilisé le 10 juillet 1972 pour photographier le Soleil en H-Lyman α au cours d'un vol fusée Aerobee ([Prinz, 1973]).

réalisées lors d'un vol fusée Aerobee à l'occasion d'une éclipse de Soleil en 1972 ([Prinz, 1973]) . L'imageur construit par le Naval Research Laboratory aux Etats-Unis faisait partie d'une suite de huit instruments possédant un contrôle du pointage sur trois axes. Cet instrument, illustré sur la figure 3.3, est composé de deux spectrographes de dispersions opposées (le premier de type Wadsworth) permettant d'obtenir au niveau de l'appareil photographique une dispersion quasi nulle. Les données ont été enregistrées sur film pour différents temps d'exposition. La figure 3.4 est une image obtenue avec un temps d'exposition de 0.241s. Les films ont été développés, puis scannés avec un microdensitomètre pour obtenir des distributions de densité puis d'intensité et enfin calibré à l'aide d'un film de référence enregistré en laboratoire. Ce vol fusée a permis d'obtenir les premières distributions d'intensité en H-Lyman α sur le disque solaire, révélant des structures aussi fines que 3" ([Prinz, 1974]). Les données de ce vol fusée ont montré notamment que la largeur des cellules du réseau chromosphérique était de l'ordre de 40" $\pm$ 20", et que les frontières du réseau étaient des structures dont la largeur est de l'ordre de 20".

2.2 Vols fusée de la Transition Region Camera (TRC)

Quelques années après le vol fusée réalisé par Prinz, l'instrument TRC a fait partie d'une expérience de vols fusée menée conjointement par le Lockheed Palo Alto Research Laboratory et le Laboratoire de Physique Stellaire et Planétaire (LPSP) du CNRS. La Transition Region Camera a volé quatre fois entre 1979 et 1985, réalisant des images du Soleil dans la raie H-Lyman α avec une résolution angulaire de 1 seconde d'arc. L'instrument en lui-même est très simple, il s'agit d'un télescope de type Cassegrain de 10.6 cm d'ouverture et 2.5 m de focale dont les miroirs ont été recouverts d' aluminium (Al) et de fluorure de lithium (LiF). Le télescope est précédé d'une roue à filtres afin de sélectionner 4 bandes spectrales : la première permettant d'observer le continu à 220 nm, la seconde centrée à 155 nm, la troisième centrée à H-Lyman α, et la dernière étant une bande large avec un pic de transmission à 120 nm. Les images du soleil ont été enregistrées sur pellicule photographique. Les objectifs scientifiques principaux de l'intrument TRC étaient l'étude du plasma de la région de transition et l'étude de la géométrie des régions actives coronales. Lors du premier vol de cet instrument

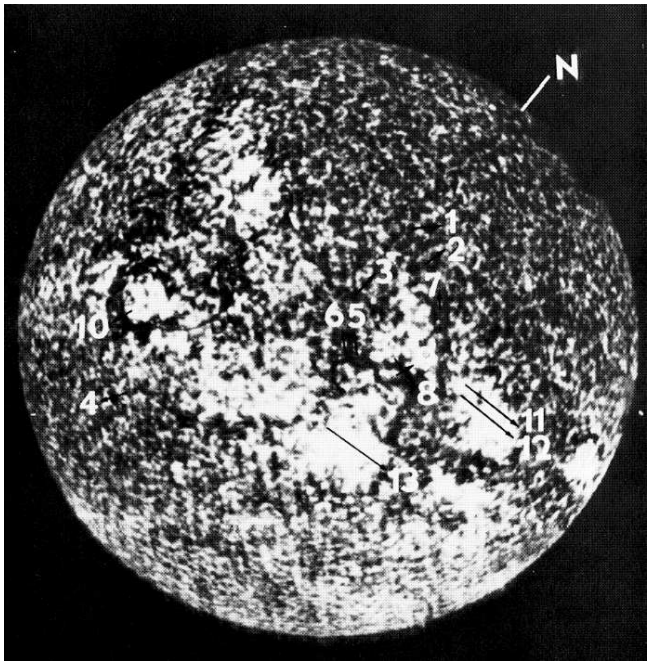

Fig. 3.4: Spectroheliogramme H-Lyman α pris lors d'un vol fusée Aerobee le 10 juillet 1972 [Prinz, 1973].

simple mais performant le 3 juin 1979, les images dans la raie H-Lyman α ont révélé des structures de petites échelles jamais observées auparavant, donnant des indications sur la géométrie du champ magnétique dans la chromosphère et la couronne ([Bonnet et al., 1980]). Le second vol en septembre 1980 a permis de mettre en évidence des formes caractéristiques d'ondes se propageant sur les images à 160 nm (les filtres étant différents à chaque vol) et une étude statistique des structures dans les images a montré une nouvelle échelle de structures à 8 Mm ([Bonnet et al., 1982] et [Foing and Bonnet, 1984]). Cette mesostructure a été à nouveau observée lors du troisième vol de l'instrument TRC en juillet 1982 ([Foing et al., 1986]). Son observation avec un bien meilleur contraste à 220 nm qu'à 160 nm en fait une structure plus liée à la photosphère qu'à la chromosphère. Enfin, un quatrième vol a eu lieu en octobre 1985, étudiant notamment les contributions respectives du continu à 160 nm et de la raie CIV dans l'émission de la couche à 100 000 K de la région de transition ([Damé et al., 1986]). Les résultats des diverses études réalisées au cours de ces vols a montré la nécessité d'améliorer encore la résolution spatiale des imageurs UV pour étudier les transferts d'énergie et la dynamique des structures magnétiques de petite échelle.

2.3 TRACE

Le satellite TRACE (Transition Region And Coronal Explorer) de la NASA fait partie du programme SMEX (SMall EXplorer) et a été lancé le 2 avril 1998. L'instrument à son bord a pour mission d'observer la photosphère, la région de transition et la couronne solaire à très haute résolution de façon continue ([Handy et al., 1999]). TRACE est un télescope de type Cassegrain (miroir primaire : parabole, miroir secondaire : hyperbole) de 30 cm d'ouverture et de 8.66 m de focale. Le champ de

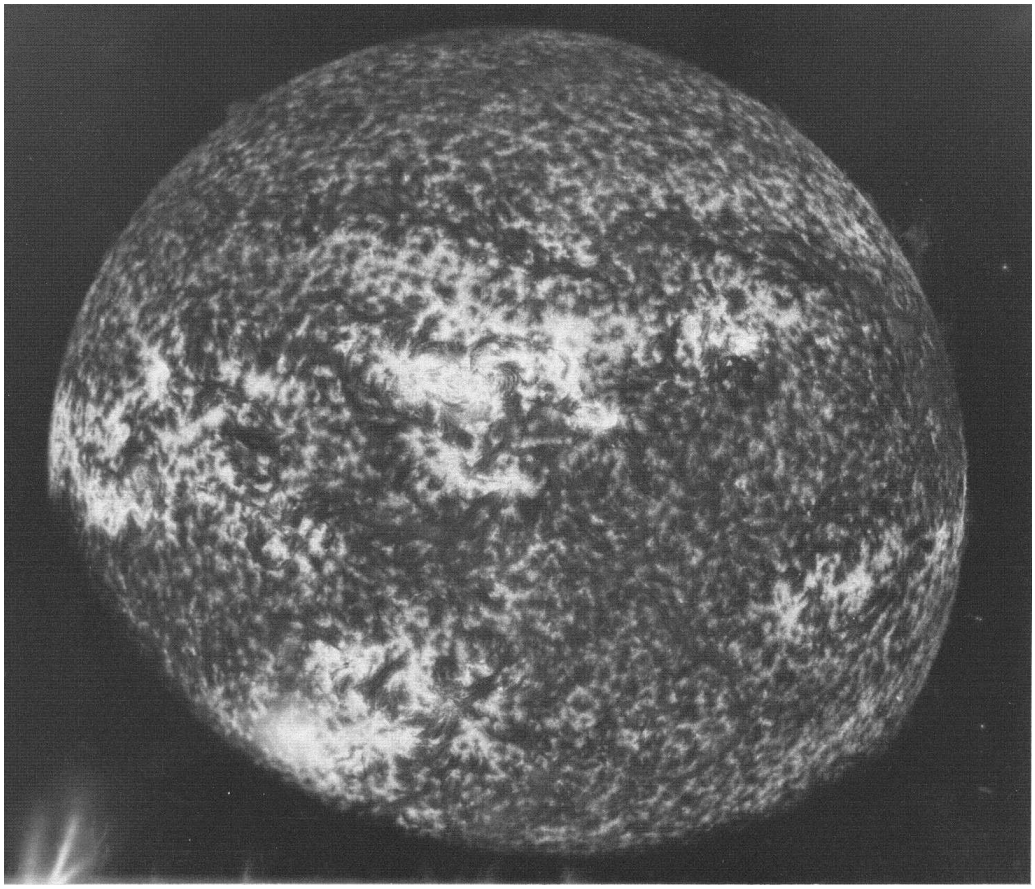

Fig. 3.5: Image TRC prise en novembre 1979 ([Bonnet et al., 1980], LPSP).

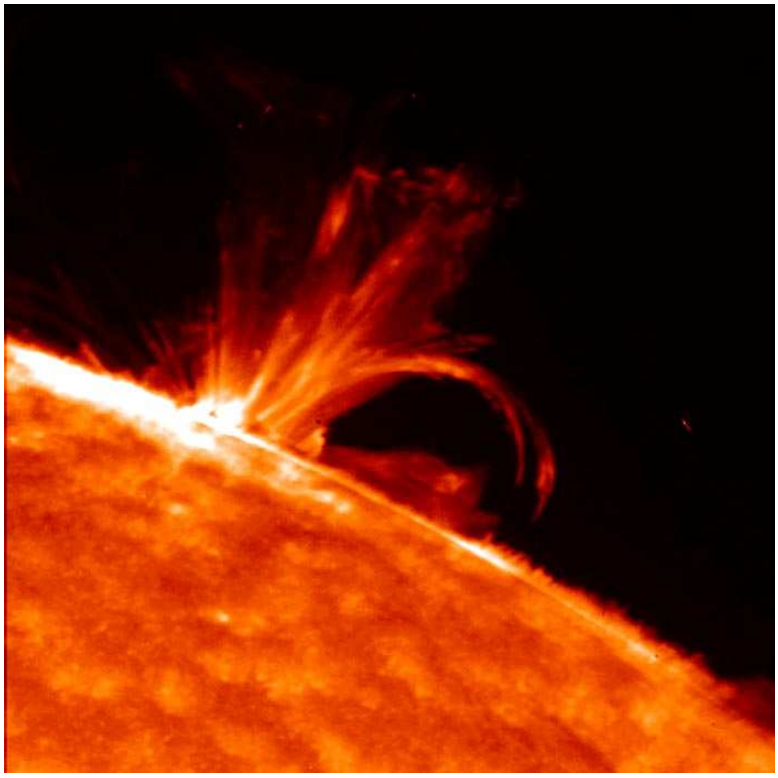

Fig. 3.6: Image TRACE H-Lyman α du 19 mai 1998 lors d'une éruption solaire (TRACE/NASA).

vue de l'instrument est un carré de 8.5 minutes d'arc de côté et la résolution spatiale du télescope est d'une seconde de d'arc. Le télescope est divisé en quatre quadrants correspondant chacun à une bande spectrale ultraviolette différente : trois dans l'ultraviolet lointain (Fe IX 17.1 nm, Fe XII 19.5 nm, et Fe XV 28.4 nm), et un dans l'ultraviolet. Deux roues à filtres permettent par la combinaison des filtres de sélectionner trois bandes plus étroites dans le quadrant UV (H-Lyman α 121.6 nm, CIV 155 nm et continu voisin). Cependant, le filtre permettant de sélectionner la raie H-Lyman α a une bande passante suffisamment large pour laisser passer une grande partie du continu. Cela entraine que plus de 50% de la lumière observée sur le disque dans la voie H-Lyman α provient en fait du continu au delà de 150 nm. Seules les observations de protubérances vue hors limbe (figure 3.6) sont purement H-Lyman α. Cette contamination des images par le continu rend délicate l'interprétation des données obtenues.

2.4 VAULT

L'instrument VAULT est un télescope de type Cassegrain suivi d'un spectrohéliographe à dispersion nulle ([Vourlidas et al., 2001b]). L'instrument a une résolution spatiale de 0.33", c'est la plus haute résolution atteinte pour un imageur à cette longueur d'onde. Il y a eu deux vols fusée de l'instrument VAULT, le premier en 1999 afin s'assurer du concept de l'instrument et le second en 2002 après quelques modifications mineures. La prise de données a duré 7 minutes pour une durée totale du vol

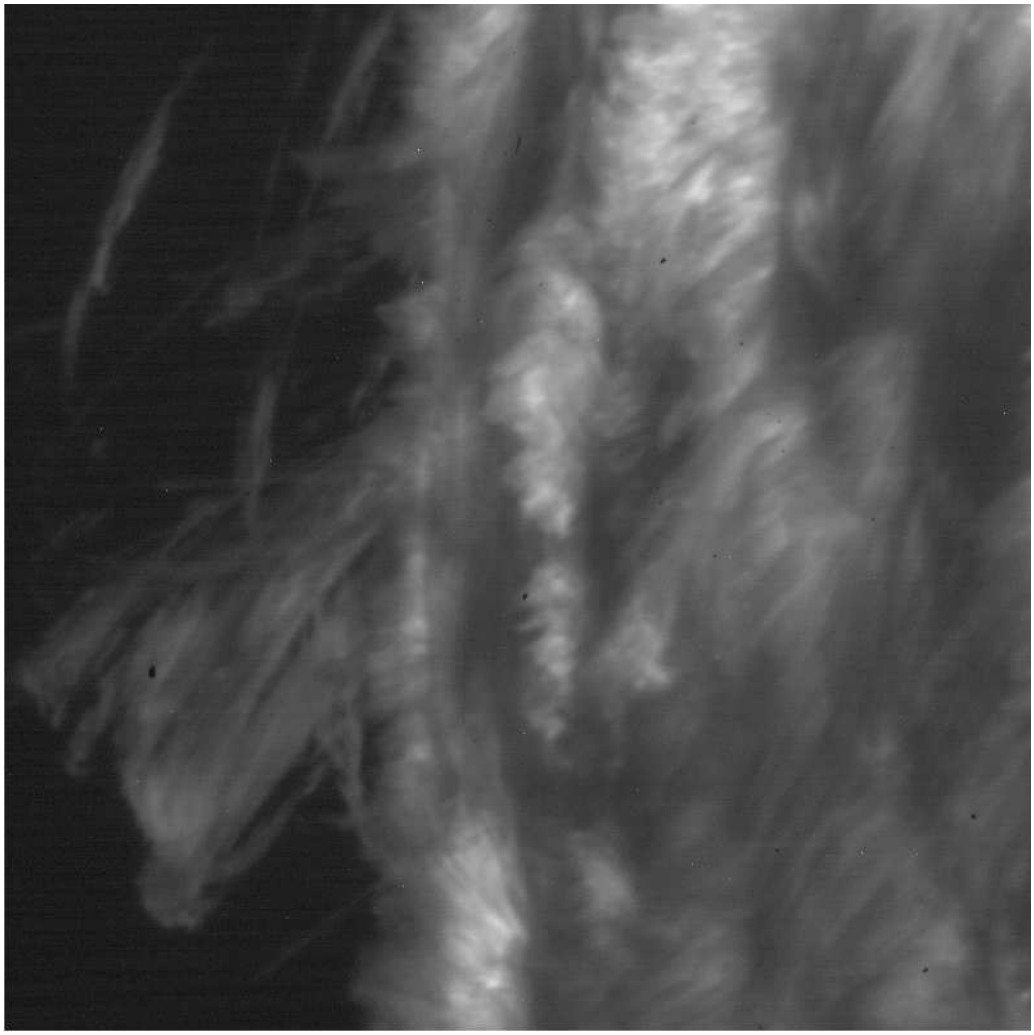

Fig. 3.7: Protubérance solaire vue en H-Lyman α par l'instrument VAULT au cours du second vol en juin 2002.

n'excédant pas 15 minutes. Il y a donc très peu de données, en tout 20 images par vol ; la figure 3.7 montre un détail de l'une de ces images : une protubérance solaire. A l'occasion du premier vol, des observations conjointes menées par d'autres intruments, notamment TRACE ont été réalisées donnant d'autres points de vue pour analyser les données. Il a ainsi été trouvé une forte corrélation entre les structures fines observées à 17.1 nm par TRACE et les structures observées dans la raie H-Lyman α mais de très grandes différences dans le niveau d'émission de celles-ci. Les résultats obtenus par ces observations H-Lyman α permettent d'affiner les contraintes et paramètres à considérer pour les modèles de mécanisme de chauffage de la couronne. D'autres analyses sont encore à effectuer sur les données des deux vols, l'une d'entre elles est exposée au chapitre suivant.

3 Spectroscopie dans la raie H Lyman α

3.1 Vols fusée et navette embarquant les premiers spectrographes H-Lyman α

De même que pour les imageurs, l'évolution de la spectroscopie UV est liée aux progrès techniques en matière de capacité d'emport des intruments, de capacité de télémesure, de conditions de propreté et de temps de mesure disponible. Ainsi entre 1946 et 1948, les spectroscopistes ont eu à leur disposition des fusées V-2 capturées lors de la Seconde Guerre Mondiale. Ces fusées n'avaient pas de système de contrôle d'attitude et ne montaient pas plus haut qu'une centaine de kilomètres dans l'atmosphère (ce qui n'est pas suffisant pour avoir des spectres solaires non atténués par l'absorption de l'atmosphère) mais ont permis de réaliser les premiers spectres à basse résolution dans l'UV comme illustré dans l'introduction de ce manuscrit (2.5). Ensuite après deux vols de fusée de type Viking, ce fut l'avènement des fusées Aerobee développées par le laboratoire de physique appliquée de l'Université John Hopkins et l'entreprise Aerojet. L'apogée de ces fusées était de 230 km permettant d'obtenir des spectres beaucoup moins atténués par l'atmosphère. Entre 1958 et 1962, le spectre solaire autour de H-Lyman α a été photographié avec une résolution atteignant 0.002 nm ([Tousey, 1963]). Puis les spectroscopistes ont vu les possibilités techniques se multiplier avec la poursuite de l'utilisation des fusées (dont les systèmes de contrôle d'attitude se sont améliorés) puis l'apparition des premiers satellites (la série des OSO : Orbiting Solar Observatory), des premières stations spatiales (Skylab) et les premières navettes spatiales (Spacelab2 sur la navette spatiale Challenger).
A bord de Skylab, l'instrument ATM (Apollo Telescope Mount) S082B est constitué d'un télescope composé d'une parabole hors axe et d'un spectrographe à double dispersion (la lumière incidente est dispersée par un premier réseau avant d'arriver sur la fente d'entrée du spectrographe). Cette expérience a permis notamment d'identifier de nouvelles raies dans le spectre solaire entre 117.5 nm et 171 nm ([Sandlin et al., 1986]). Toujours à bord de la station Skylab, un spectromètre-spectrohéliomètre (expérience S055) réalisé par le Harvard College Observatory offrait plusieurs modes de fonctionnement de type rasters spatiaux et spectraux mais avec une faible résolution spectrale de 0.1 nm ([Reeves et al., 1977]). L'instrument comportait sept voies de détection centrées sur sept raies solaires dont la raie H-Lyman α. La figure 3.9 précente 3 rasters spectraux réalisés sur différentes structures solaires, et la figure 3.8 un raster spatial (5 arcmin $\times$ 5 arcmin) pour la raie du C III à 97.7 nm.
Une étude très complète de la raie H-Lyman α a été menée par le NRL lors du premier vol fusée de leur instrument HRTS (High Resolution Telescope and Spectrograph) ([Basri et al., 1979]). Le programme HRTS a consisté en huit vols fusée et un vol à bord de la navette spatiale dans le cadre de Spacelab2, l'instrumentation étant légèrement modifiée pour répondre aux objectifs scientifiques de la mission. Le premier vol HRTS a eu lieu le 21 juillet 1975. L'instrument est constitué d'un télescope de type Cassegrain suivi d'un spectrographe composé d'un tandem de réseaux montés en Wadsworth. Sa résolution spatiale est de 0.8" et sa résolution spectrale est de 0.005 nm. Le profil de la raie H-Lyman α a été étudié pour différentes structures solaires comme illustré sur la figure 3.1, afin notamment d'améliorer les modèles d'atmosphère solaire et de formation des différentes structures. Peu après, un autre spectrographe UV de mêmes résolutions spatiale et spectrale ([Bartoe et al., 1977]) a volé à bord de la station Skylab.

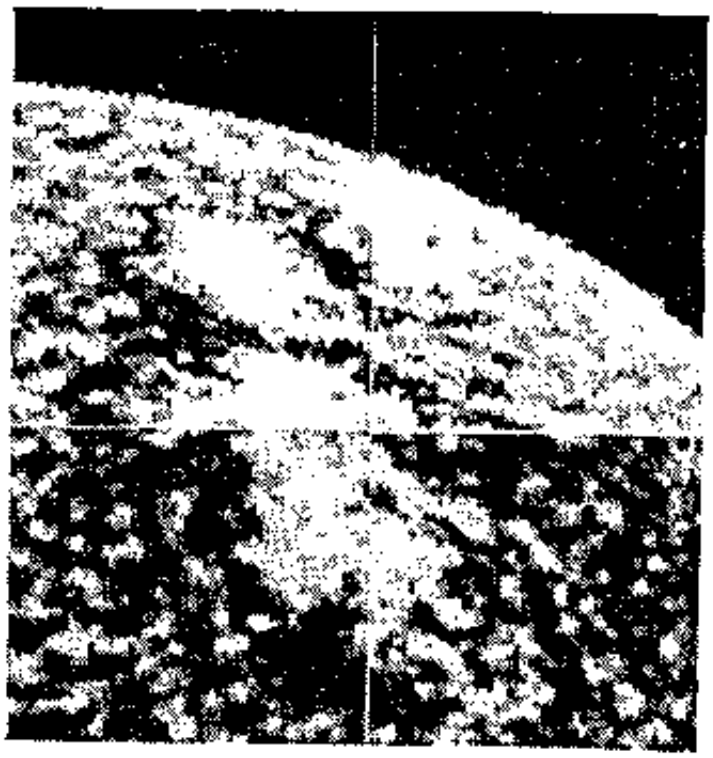

Fig. 3.8: Image composite de quatre rasters spatiaux dans la raie du C III (97.7nm) montrant plusieurs régions actives proches du bord solaire. Image enregistrée le 11 septembre 1973 sur l'ATM ([Reeves et al., 1977]).

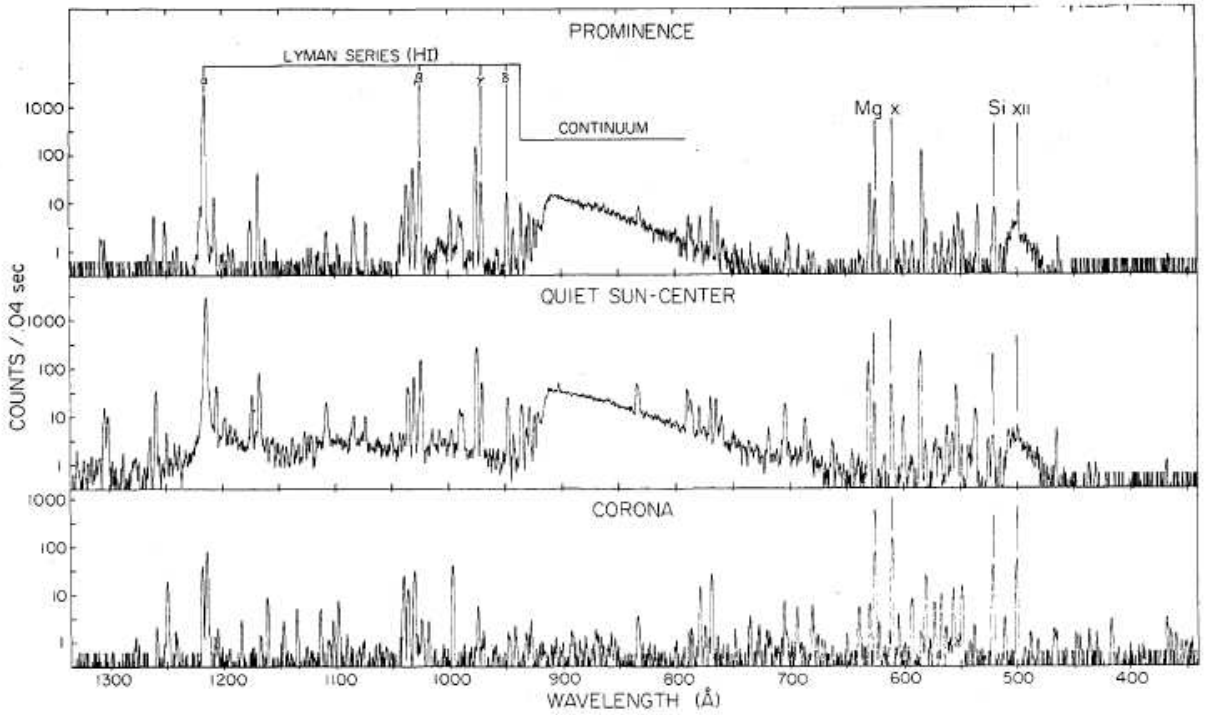

Fig. 3.9: Trois rasters spectraux enregistrés sur une protubérance (en haut), sur une partie calme du soleil (au milieu) et dans la couronne (en bas). Données enregistrées par l'instrument S055 sur l'ATM ([Reeves et al., 1977]).

3.2 Les satellites OSO ; le cas de OSO8.

La mission de la série de satellites OSO (Orbiting Solar Observatory) était de recueillir des données sur les émissions UV, X et γ du Soleil (mais aussi de notre galaxie) pendant tout un cycle solaire. Les 6 premiers satellites pouvaient embarquer environ 70 kg d'instrumentation. Les missions OSO 2, OSO 4 et OSO 6 avaient à leur bord des spectromètres EUV qui ont permis notamment d'observer des éruptions solaires en EUV ([Wood, 1972]) et d'étudier le spectre ultraviolet d'une région active avec une résolution spectrale de 0.2 nm ([Dupree et al., 1973]). Les deux satellites OSO suivants étaient de conception différente ; 4 fois plus gros, ils étaient composés d'un panneau solaire supportant quelques instruments pointés vers le Soleil et d'un cylindre en rotation d'axe perpendiculaire aux instruments pointant le Soleil. Le dernier satellite de la série, OSO 8 illustré sur la figure 3.10, avait un système de stabilisation de pointage bien plus performant que ses prédécesseurs : les instruments étaient pointés vers le Soleil avec une précision de ± 1" pendant un laps de temps de 5 minutes, et les instruments pouvaient être dépointés de façon à réaliser des balayages du Soleil sur une zone rectangulaire pouvant atteindre au maximum $44' \times 40'$ ([Artzner et al., 1977]). L'instrument réalisé par le LPSP (Laboratoire de physique stellaire et planétaire) et lancé en 1975 est composé d'un télescope de type Cassegrain suivi d'un spectromètre de type Czerny-Turner modifié : la lumière provenant du Soleil est focalisée par le télescope sur la fente d'entrée du spectromètre, puis la lumière est collimatée par une parabole hors d'axe et diffractée (dans des ordres très élevés) par un réseau plan. Enfin, la lumière est focalisée simultanément sur six détecteurs par une parabole sur l'axe pour la voie H-Lyman α mais hors axe pour les voies H-Lyman β (102.5 nm) et Mg II h (280.3 nm) et k (279.6 nm) et par un miroir Mangin (aluminé sur sa face arrière) pour les voies Ca II H (396.9 nm) et K (393.4 nm). Pour chaque voie, les longueurs d'onde autour de la référence sont balayées en faisant tourner le réseau plan par pas de 2.63". Le miroir secondaire du télescope est mobile ce qui rend possible le balayage d'une zone d'intérêt de 64 " de côté par pas de 1". Les deux éléments mobiles de l'instrument autorisent la réalisation de balayages spatiaux et spectraux. La partie spectromètre de cet instrument est illustrée sur la figure 3.11.
L'instrument du LPSP à bord d'OSO 8 avait pour principaux objectifs scientifiques l'observation de la chromosphère calme et active, des protubérances et éruptions solaires et l'étude en trois dimensions de structures inhomogènes de la chromospère telles que le réseau chromosphérique, les plages, taches, trous coronaux et spicules ([Lemaire et al., 1981] et [Gouttebroze et al., 1978]). L'étude des profils des six raies dans les protubérances quiescentes et actives a permis de faire progresser les modèles de ces structures en introduisant notamment les vrais profils des raies mesurés par OSO 8 comme source de radiation incidente ([Vial, 1982]). Les résultats des simulations de ces modèles ont montré en autres limitations la nécessité de connaitre la topologie du champ magnétique et d'effectuer plus d'observations de protubérances dans les mêmes raies.

3.3 Solar Maximum Mission

La mission Solar Maximum (SMM) de la NASA a été lancée en 1980 pour étudier l'atmosphère solaire active, les protubérances et les éruptions solaires plus fréquentes autour du maximum du cycle solaire. Parmi les instruments embarqués on comptait un spectromètre-polarimètre dans l'ultraviolet (UVSP) couvrant le domaine de longueurs d'onde allant de 115 nm à 360 nm. L'instrument est composé d'un télescope de type Gregory et d'un spectromètre de type Ebert-Fastie à l'entrée duquel différentes

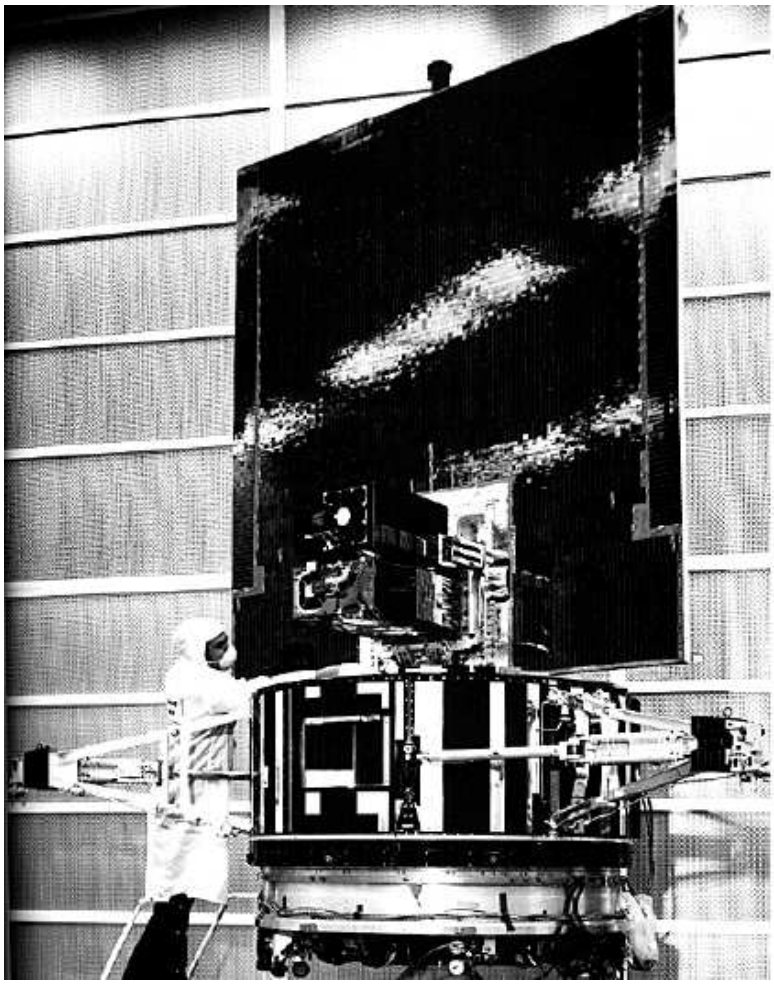

Fig. 3.10: Photographie du satellite OSO 8 (NASA/GSFC).

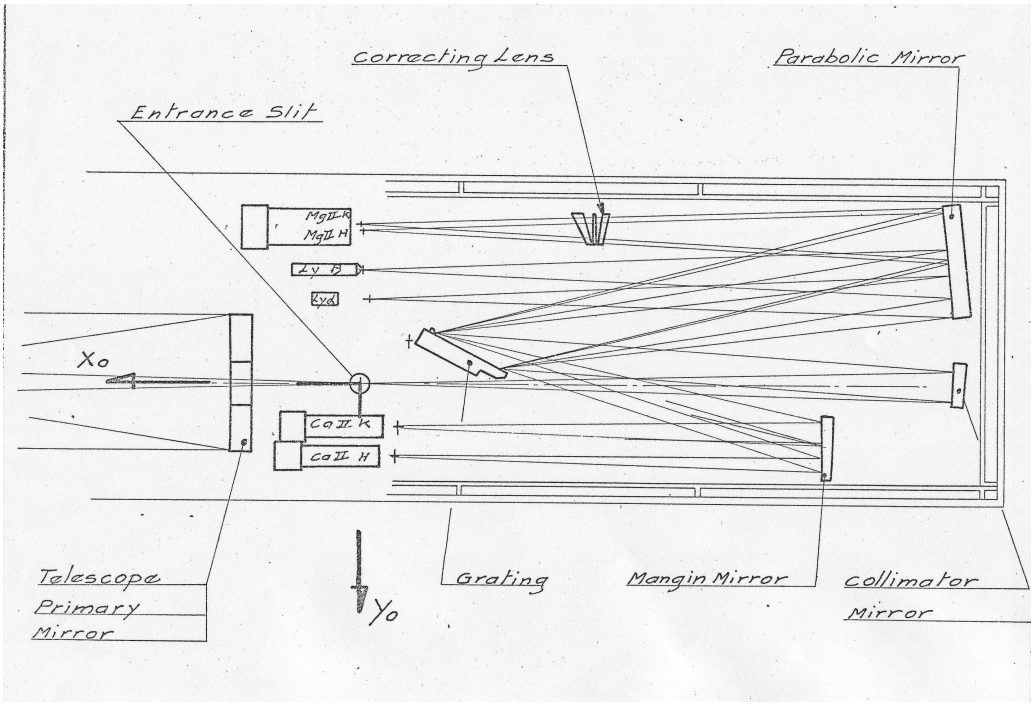

Fig. 3.11: Schéma optique du spectromètre de l'instrument LPSP sur OSO 8 (NASA/GSFC).

lames de phase peuvent être insérées afin de réaliser un polarimètre dans lequel le réseau de diffraction du spectromètre est l'analyseur ([Woodgate et al., 1980]). La résolution spatiale de l'UVSP est de 2" et le déplacement du miroir secondaire du télescope permet d'effectuer un balayage spatial sur une zone de 256 secondes d'arc de côté. La résolution spectrale de l'instrument est de 0.004 nm. Les observations à très haute résolution spectrale du profil de la raie H-Lyman α avec UVSP sont à l'origine d'un modèle de la région de transition en trois couches ([Fontenla et al., 1988]) cohérent avec les variations du centre renversé de la raie. Cependant certaines hypothèses sur la morphologie d'une des couches sont faites en l'absence d'imagerie simultanée à la mesure des spectres.

3.4 SUMER

Le spectromètre SUMER (Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation) à bord du satellite SOHO est le plus récent des spectromètres spatiaux très haute résolution opérant à H-Lyman α. SUMER couvre en fait tout le domaine de longueurs d'onde allant de 50 nm jusque 162 nm avec une résolution spectrale de 0.004 nm. Le schéma optique de l'instrument SUMER est illustré sur la figure 3.13. La lumière du Soleil est focalisée sur la fente d'entrée du spectromètre par une parabole hors axe. Cette parabole est mobile afin de pouvoir effectuer le balayage d'une zone de 32 minutes de degré de côté. Une seconde parabole hors axe collimate le faisceau à la sortie de la fente. Ce faisceau est ensuite réfléchi sur un réseau de diffraction concave (monté en Wadsworth) par un miroir plan ([Wilhelm et al., 1995]). Ce dernier est mobile afin de pouvoir balayer tout le domaine de longueur d'onde. Deux détecteurs bi-dimensionnels à galette de microcanaux sont placés côte à côte dans le plan

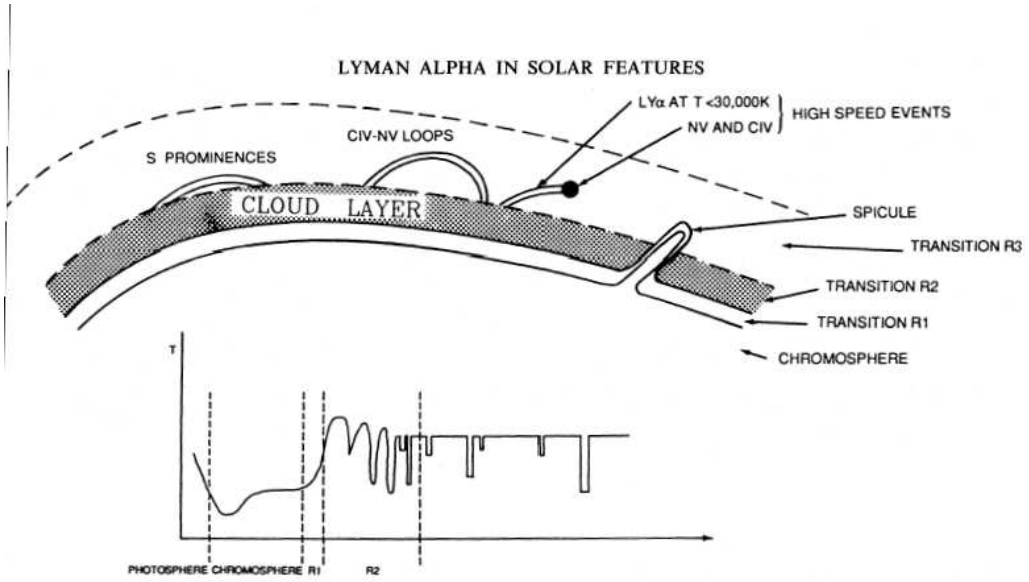

Fig. 3.12: Modèle en trois couches de la région de transition proposé par [Fontenla et al., 1988] à partir des données UVSP à bord de SMM.

focal du réseau, permettant ainsi d'enregistrer deux ordres de diffraction. La résolution spatiale de cet instrument est d'une seconde d'arc et une résolution temporelle pouvant aller jusqu'à une seconde pour les raies les plus intenses. L'instrument est également capable de mesurer des vitesses de 1 $km.s^{-1}$ par décalage Doppler des raies. Cela rend SUMER particulièrement adapté à l'étude des petites structures dynamiques de la couronne et des questions relatives au vent solaire. Une grande quantité de données a été recueillie (jusqu'à présent plus de 400 publications de rang A) et SUMER est toujours opérationnel. Les analyses de ces données ont permis de nombreuses avancées en physique solaire, par exemple dans la description du soleil calme, de sa structure et de sa dynamique ([Lemaire, 2005]). Jusqu'à la fin de l'année 2004, les études dans la raie H-Lyman α étaient des observations indirectes à partir de la mesure hors du bord de la lumière diffusée de l'instrument. En effet, le signal produit par la raie H-Lyman α était trop intense pour les détecteurs de SUMER, même la grille en aluminium placé devant une partie du détecteur pour l'atténuer n'a pas pu être utilisée, elle posait trop de problèmes de déconvolution. Les études de la raie H-Lyman α sur le disque était donc interdites dans le but de préserver les détecteurs le plus longtemps possible. Ces études indirectes dans la raie H-Lyman α grâce au spectromètre SUMER ont fait l'objet de nombreuses publications, notamment concernant les variations du profil de la raie moyennée sur tout le disque solaire ([Lemaire et al., 1998] et [Emerich et al., 2005]). Depuis novembre 2004 seulement il est possible d'effectuer des mesures directes, ce qui donne déjà lieu à des publications ([Vial et al., 2005]) et montre également l'intérêt d'avoir un spectromètre dédié à cette longueur d'onde qui puisse réellement être optimisé pour celle-ci.

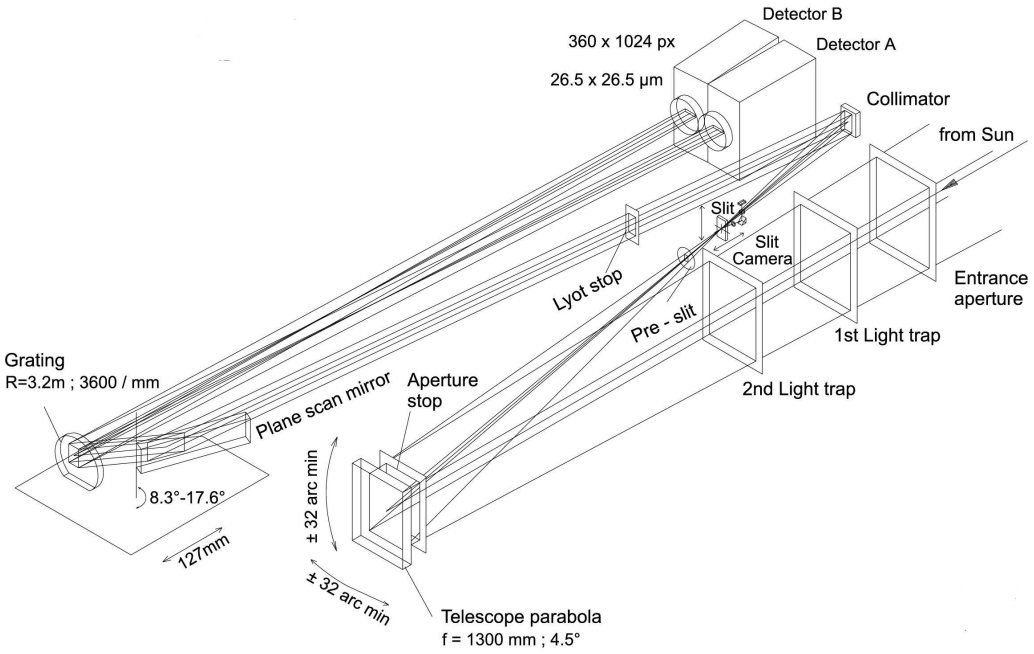

Fig. 3.13: Schéma optique du spectromètre SUMER sur SOHO [Wilhelm et al., 1995].

4 Conclusion

La couronne et la région de transition solaire sont des zones de très hautes températures où la matière est fortement ionisée et magnétisée et où les structures évoluent très rapidement, trop rapidement pour les spectromètres et les imageurs réalisés jusqu'à présent. Les vitesses caractéristiques dans la couronne sont élevées (vitesse du son : 100 km.s^{-1}, vitesse d'Alfven : 1000 km.s^{-1}) par rapport aux cadences temporelles des imageurs actuellement disponibles ou prochainement opérationnels : les imageurs embarqués sur SDO (lancement avril 2008) auront une cadence maximale de 10 s, mais pas dans le mode de fonctionnement nominal, et le spectromètre à bord de Solar B (lancement en 2006) aura une cadence de 1 minute.
Plusieurs spectromètres UV à fente de très grande qualité ont été conçus et utilisés pour l'étude du Soleil, ces spectromètres ont une très bonne résolution spectrale et une très bonne résolution spatiale dans la direction opposée à la dispersion de la lumière. Pour le spectromètre SUMER par exemple, le pouvoir de résolution atteint 38 000, pour une résolution spatiale de 1 seconde d'arc et une cadence maximale d'un spectre par seconde. Cependant, ces instruments ne sont pas parfaitement adaptés à l'étude de phénomènes très dynamiques comme le sont ceux de l'atmosphère solaire. En effet, en raison de largeur des fentes utilisées et du temps nécessaire à l'envoi des commandes de pointage du l'instrument sur le satellite, il n'est pas toujours évident de réaliser l'observation souhaitée ou de savoir quelle structure est effectivement observée en l'absence d'imagerie dans la même longueur, à la même résolution et bien sûr simultanée. Ces structures peuvent se déplacer ou disparaître de façon imprévisible. Il existe donc un réel besoin en physique solaire pour un spectromètre imageur UV, et dans la raie H-Lyman α en particulier, à très haute résolutions spectrale, spatiale et temporelle, avec

une cadence très élévée.
En ce qui concerne l'étude du Soleil dans la raie H-Lyman α, on remarque qu'il existe peu de données en imagerie avec une très haute résolution et une bande passante suffisament étroite. Il existe encore moins d'images que l'on puisse associer à des études spectrométriques à la même longueur d'onde sur la même région. Les images des vols fusée VAULT sont particulièrement intéressantes, même si bien sûr le volume des données est insuffisant. En effet, ces images permettent d'observer, à la meilleure résolution disponible actuellement et avec une cadence élevée, une grande variété de structures solaires : régions actives, soleil calme, filaments de région active et protubérances.