

Annexe A

Les regards tournés vers le Soleil

Résumé

Depuis la fin des années 80, l'observation spatiale joue un grand rôle dans l'étude de Soleil. Lancé en Décembre 1995, le satellite SOHO est le meilleur exemple des ambitions des physiciens solaires et des possibilités technologiques qu'offre l'aventure spatiale. SOHO comprend 12 instruments dédiés à l'étude de l'héliosismologie, du chauffage de la couronne et du vent solaire. Lors de campagnes d'observation au centre d'opération MEDOC, des programmes scientifiques sont développés et mis en oeuvre. Nous avons participé à ces campagnes et créé des programmes d'observation impliquant des instruments de SOHO (SUMER, CDS, MDI) et des instruments au sol (IVM, HSP, DPSM) dont nous précisons les spécificités.

A-1 La mission SOHO

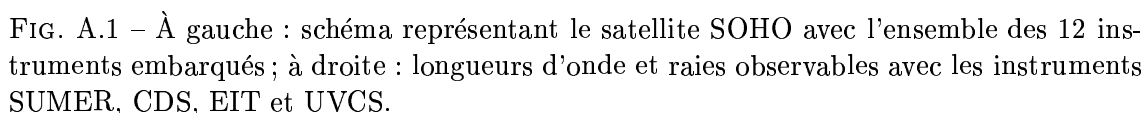
La mission SOHO (**S**olar and **H**eliographic **O**bservatory) est dédiée à l'étude des phénomènes solaires dans leur ensemble, c'est-à-dire depuis l'intérieur solaire jusqu'aux mesures *in situ* du vent solaire. Pour cette mission, trois principaux objectifs scientifiques ont été définis (Domingo et al., 1995) : sonder l'intérieur du Soleil à l'aide des méthodes d'héliosismologie, étudier les mécanismes de chauffage de la couronne solaire, et déterminer la nature et les processus d'accélération dans le vent solaire. Pour ce faire, 12 instruments ont été réunis sur le même satellite (Fig. A.1 à gauche) dans le but d'étudier l'évolution de notre étoile pendant une période de minimum d'activité solaire, 24 h/24, et pour une durée minimale de 2 ans.

Les instruments GOLF (Global Oscillations at Low Frequencies; Gabriel et al., 1995), VIRGO (Variability of solar IRradiance and Gravity Oscillations; Frohlich et al., 1995), et MDI/SOI (Michelson Doppler Imager/Solar Oscillations Investigation; Scherrer et al., 1995) ont pour but de déterminer les propriétés de zones internes du Soleil en étudiant la propagation des ondes acoustiques ou gravitationnelles au niveau de la photosphère (héliosismologie).

L'étude de l'atmosphère solaire s'effectue avec des spectromètres et des imageurs EUV tels que SUMER (Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation; Wilhelm et al., 1995), CDS (Coronal Diagnostic Spectrometer; Harrison et al., 1995), EIT (Extreme-ultraviolet Imaging Telescope; Delaboudinière et al., 1995), UVCS (UltraViolet Coronagraph Spectrometer; Kohl et al., 1995) et SWAN (Solar Wind ANisotropies; Bertaux et al., 1995) ainsi qu'avec le coronographe LASCO (Large Angle Spectroscopic Coronagraph; Brueckner et al., 1995). Ces instruments couvrent une très grande partie de l'atmosphère solaire de la surface à $30 R_{\odot}$ ainsi qu'une très large bande spectrale dans l'extrême-ultraviolet (Fig. A.1 à droite) entre 150 et 1600 Å.

Pour l'étude *in situ* du vent solaire, la composition, l'énergie ou les vitesses des particules sont mesurées par CELIAS (Charge, ELe ment and Isotope Analysis System; Hovestadt et al., 1995), COSTEP (COMprehensive SupraThermal and Energetic Particle analyser; Muller-Mellin et al., 1995) et ERNE (Energetic and Relativistic Nuclei and Electron; Torsti et al., 1995).

En Janvier 1996, le satellite SOHO (ESA-NASA) a été mis en orbite autour du point de Lagrange L1 (point d'équilibre des forces gravitationnelles de la Terre et du Soleil) et depuis observe le Soleil 24 h/24. Les premiers résultats obtenus sont regroupés dans le livre "*First Results from SOHO*" (Fleck & Svestka, 1997) et met en évidence la variété et la qualité des observations. Vial (1999) résume les différentes découvertes de SOHO dans le domaine d'étude de l'atmosphère solaire : le rôle des phénomènes de reconnexion magnétique à différentes échelles spatiales (par exemple, dans les points brillants) dans le chauffage de la couronne, l'émergence de flux magnétique aux frontières du réseau chromosphérique, la génération d'ondes MHD, l'accélération des particules, le développement des éjections de masse coronale, ou encore l'origine et la nature mutli-fluide du vent solaire. Depuis 5 ans, les observations obtenues par SOHO ont couvert une période de minimum d'activité solaire, et actuellement une période de maximum d'activité solaire liée à une inversion du champ magnétique.



Une autre des spécificités de la mission SOHO est de pouvoir définir les programmes scientifiques d'observations aisément quasiment "en temps réel" ce qui permet de s'adapter aux conditions solaires. Ces opérations sont réalisées soit depuis le GSFC (Goddard Space Fly Center, Washington), soit à partir du centre européen MEDOC (Multi-Experiment and Data Operating Center, IAS, Orsay). Lors des opérations ou campagnes d'observations MEDOC, j'ai pu définir des programmes scientifiques pour les instruments SUMER ou CDS ainsi que réaliser des observations (par exemple, le JOP 124, voir Chap. VI). L'ensemble de mes participations aux différentes campagnes MEDOC est résumé dans le tableau A.1.

Nous allons maintenant présenter les instruments utilisés pour les observations développées dans les chapitres III et V. En particulier, nous insisterons sur la mesure du champ magnétique vectoriel ainsi que le traitement de données spectroscopiques fournies par le spectromètre SUMER.

Campagne	Opération	Date	Instrument	Commentaires
#3	observations	10 Mai 99	SUMER, CDS	16–18 UT, filament
		12 Mai 99	CDS	16–18 UT, filament
		15 Mai 99	SUMER, CDS	20–22 UT, filament
#4	planning	11–17 Oct. 99	SUMER	
	observations	08 Oct. 99	SUMER	9–17 UT, filament
		13–14 Oct. 99	SUMER	22–07 UT, filament
		17 Oct. 99	SUMER	16–24 UT, filament
#5	planning	15–21 Mai 00	CDS	avec S. Patsourakos
	observations	3 Mai 00	SUMER	17–24 UT, filament
		11 Mai 00	CDS	16–19 UT, test
		13–16 Mai 00	JOP 124 SOHO-THÉMIS SUMER-CDS-EIT-MDI-DPSM-MTR	
			07–18 UT, filament	
		18–19 Mai 00	SUMER, CDS	19–03 UT, protu.
		19 Mai 00	SUMER, CDS	8–16 UT, protu.
		20 Mai 00	SUMER	16:30–24 UT, protu.
#6	planning	30 Oct.–5 Nov. 00	CDS	
	observations	31 Oct. 00	SUMER, CDS	17–24 UT, JOP 124
		2 Nov. 00	SUMER, CDS	18–24 UT, JOP 124
		3–4 Nov. 00	SUMER, CDS	18–01 UT, JOP 124
		4 Nov.	SUMER	19–24 UT, JOP 124
#7	observations	15 Mai 01	SUMER, CDS	16–24 UT, JOP 124
		16 Mai 01	SUMER, CDS	17–24 UT, JOP 124
		17–18 Mai 01	SUMER	20–03 UT, JOP 124
		18 Mai 01	CDS	18–24 UT, JOP 124
		19 Mai 01	CDS	7–18 UT, JOP 124
		23 Mai 01	SUMER	6–13 UT, filament

TAB. A.1 – Liste des campagnes MEDOC : réalisations des plannings scientifiques de SUMER et de CDS, et observations de filaments et de protubérances.

A-3 Magnétographes

1 MDI/SOHO

L'instrument SOI/MDI (Scherrer et al., 1995) est dédié à l'étude des oscillations solaires par leurs manifestations photosphériques. L'imageur MDI permet de mesurer l'intensité du continuum, la vitesse Doppler ainsi que la distribution du champ magnétique suivant la ligne de visée. Des polariseurs permettent de mesurer le déplacement Doppler de la raie

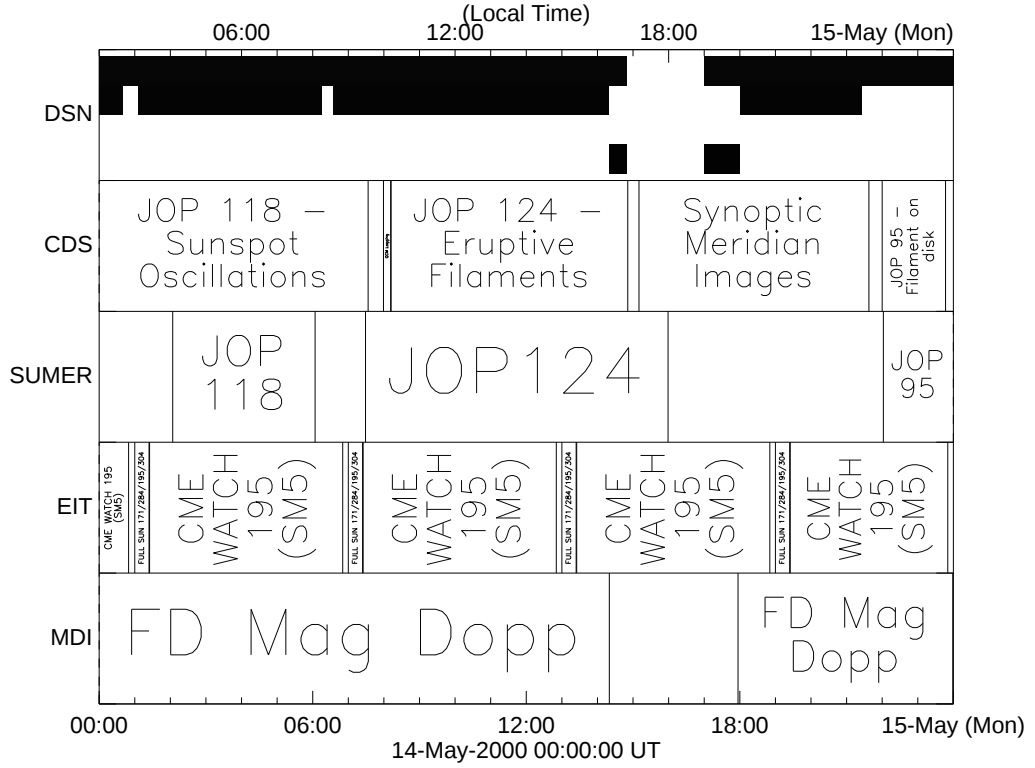


FIG. A.2 – Exemple de planning scientifique CDS réalisé lors de la campagne MEDOC #5 (Mai 2000) : coordination des instruments CDS et SUMER pour les JOP 118, 124 et 95, programmes journaliers ("Synoptic Meridian Images") et programmes techniques ("QCM Logging").

pour la lumière polarisée circulairement à droite et à gauche ce qui permet de déduire la séparation due à l'effet Zeeman qui est proportionnelle au champ magnétique. Les enregistrements sont réalisés dans la raie d'absorption du NiI à 6768 Å. Utilisant une caméra CCD 1024×1024, des images du disque entier (résolution spatiale de 4") ou à haute résolution (1.2") sont produites chaque minute (intensité + vitesse, ou champ magnétique) ou avec une cadence de 96 minutes (champ magnétique).

Les magnétogrammes que nous avons utilisés sont produits toutes les 96 minutes avec une résolution spatiale de 4". Par contre pour le JOP 124 (13–16 Mai 2000), les planneurs MDI (S. Gregory et E. Zamkoff) ont supporté nos observations en obtenant un magnétogramme du disque entier avec une cadence temporelle d'une minute.

2 HSP et IVM (Mees Solar Observatory)

La mesure du champ magnétique vectoriel permet de déterminer le module et la direction du vecteur champ magnétique. Les magnétographes vectoriels, HSP et IVM (Mees

Solar Observatory, Hawaï), utilisent les propriétés de polarisation de certaines raies photosphériques pour mesurer les quatre paramètres de Stokes I, Q, U et V où I représente l'intensité totale, Q et U décrivent la polarisation linéaire (0° ou 90° pour Q, et $\pm 45^\circ$ pour U) et V décrit la polarisation circulaire.

HSP

Le magnétographe vectoriel HSP (Haleakala Stokes Polarimeter ; Mickey, 1985) a les caractéristiques suivantes : l'enregistrement des quatre paramètres de Stokes est simultané, la précision polarimétrique est de 10^{-4} , la résolution spatiale de $4''$ et la résolution temporelle de 1 s. Un balayage complet d'une région de $185'' \times 185''$ prend environ 50 minutes. La raie généralement utilisée est la raie du FeI à $6302.5 \text{ \AA}$. L'inversion des paramètres de Stokes se fait suivant la méthode développée par Skumanich & Lites (1987).

IVM

Le magnétographe vectoriel IVM (Imaging Vector Magnetograph ; Mickey et al., 1996) est en opération depuis 1992 à Hawaï. À la différence d'HSP, il utilise une matrice CCD donnant des informations 2D mais ne permet pas l'enregistrement simultané des paramètres de Stokes. Les images obtenues couvrent un champ de vue de $280'' \times 280''$ avec une résolution spatiale d'environ $1''$. Le temps mis pour construire un magnétogramme est de 2 à 10 min. La précision polarimétrique est de 10^{-3} . Pour obtenir une meilleure sensibilité, plusieurs magnétogrammes sont moyennés. La raie généralement utilisée est la raie du FeI à $6302.5 \text{ \AA}$. La méthode d'inversion des paramètres de Stokes est développée par Jefferies & Mickey (1991).

A-4 Spectrographes, spectromètres

1 SUMER/SOHO

SUMER (Wilhelm et al., 1995) est un spectrographe à incidence normale embarqué à bord de SOHO. Le mode de fonctionnement et les spécificités de l'instrument SUMER ont été détaillés par Lemaire et al. (1997), Wilhelm et al. (1997), Lamartinie (1997), Régnier (1997) ou Raouafi (2000). Deux détecteurs de $1024\text{px} \times 360\text{px}$ sont à notre disposition : le détecteur A entre $390 \text{ \AA}$ et $805 \text{ \AA}$ au 1^{er} ordre (de $780 \text{ \AA}$ à $1610 \text{ \AA}$ au 2^{ème} ordre), le détecteur B entre $330 \text{ \AA}$ et $750 \text{ \AA}$ au 1^{er} ordre (de $660 \text{ \AA}$ à $1500 \text{ \AA}$ au 2^{ème} ordre). Le détecteur A a été utilisé pour les observations détaillées au Chapitre V. La résolution spectrale est de $\sim 40 \text{ m\AA}$ au 1^{er} ordre et de $20 \text{ m\AA}$ au 2^{ème} ordre. Différentes fentes sont utilisées : $1'' \times 300''$, $1'' \times 120''$, $0.3'' \times 120''$ (choisie pour nos observations), et $4'' \times 300''$. Les données brutes doivent être corrigées du "flatfield" tenant compte de la réponse de chaque pixel, des distorsions des raies suivant leur position sur le détecteur, des trous de télémètre, des pixels saturés (par exemple par des rayons cosmiques). L'instrument peut prendre en compte de façon automatique la compensation de la rotation solaire.

Après le traitement des données, les cartes en intensité peuvent être produites. Nous n'avons pas calibré en intensité les données : la calibration multiplie par un facteur constant

les intensités de chaque raie. Cette calibration n'a aucune influence sur le calcul des vitesses Doppler.

L'instrument fournit des observations avec des hautes résolutions spatiale, spectrale et temporelle. SUMER a permis d'étudier de nombreux phénomènes solaires tels que le chauffage coronal, les événements liés à l'activité solaire (points brillants, protubérances, filaments, réseau chromosphérique, ...) ou les manifestations de la propagation d'ondes dans l'atmosphère, et aussi de diagnostiquer les paramètres du plasma telles que la densité, la température ou les vitesses caractéristiques (Lemaire et al. (1997), Wilhelm et al. (1997) ou voir Raouafi (2000) pour une revue détaillée des articles).

2 CDS/SOHO

CDS (Harrison et al., 1995) est un double spectrographe fonctionnant soit en incidence rasante (GIS), soit en incidence normale (NIS). Nous n'avons utilisé que le détecteur NIS. Le balayage d'une fente ($2'' \times 240''$, $4'' \times 240''$, $90'' \times 240''$) permet d'obtenir des images et les spectres associés à chaque point de l'image pour un intervalle de longueur d'onde (308–381 Å, 513–633 Å). Un programme d'observation peut contenir plusieurs raies observées simultanément. La résolution spectrale est d'environ 110 mÅ pour le détecteur NIS1 de 70 mÅ pour NIS2. Le temps mis pour obtenir une image dépend principalement du nombre de raies sélectionnées et du champ de vue.

Les corrections à apporter aux données brutes sont la position des raies sur le détecteur (pas parallèle aux colonnes du détecteur, le décalage de l'origine des longueurs d'onde en fonction de la position du miroir), le "flatfield", les rayons cosmiques, les trous de télémètre, la calibration en intensité, les variations thermiques. Dans nos observations, nous avons choisi de placer la fente sur une partie du filament et de suivre cette portion pendant plusieurs heures avec une résolution temporelle de 24 s. Les observations effectuées sont très sensibles aux variations de température de l'instrument.

L'instrument CDS a pour principaux buts scientifiques de déterminer le processus de chauffage de la couronne et l'accélération du vent solaire. Pour ce faire, CDS permet de diagnostiquer des paramètres du plasma coronal tels que la densité, la température, les vitesses turbulentes. Des rapports de raies sensibles à la température ou à la densité sont utilisées (Harrison et al., 1995). L'ensemble des nombreux articles publiés concernant le chauffage coronal, le vent solaire, la détermination des paramètres plasma ou les événements éruptifs sont résumés à l'adresse suivante : "<http://solg2.bnsc.rl.ac.uk/results/publications.shtml>"

3 DPSM/THEMIS

Le DPSM (Multi channel Subtractive Double Pass, Mein, 1977, Mein, 1991) est un spectro-imageur permettant d'enregistrer simultanément plusieurs raies avec de très grandes résolutions spatiale et temporelle. Pour l'analyse de polarisation, les quatre paramètres de Stokes (ou plutôt, des sommes ou différences de paramètres) sont enregistrés simultanément. Il existe trois modes de fonctionnement :

- modélisation de la photosphère et de la chromosphère utilisant une raie ou une série de raies : la résolution spatiale est comprise entre $0.2''$ et $0.6''$, les raies utilisées sont $H\beta$ à $5173 \text{ \AA}$, $MgI \text{ b2}$ à $5173 \text{ \AA}$, $He \text{ D3}$ à $5876 \text{ \AA}$, $Na \text{ D2}$ à $5890 \text{ \AA}$, $H\alpha$ à $6563 \text{ \AA}$ et $CaII$ à $8542 \text{ \AA}$. Le temps d'exposition est d'environ 300 ms ;
- balayages rapides utilisant les raies de Balmer, $H\beta$ et $H\alpha$. La résolution spatiale est comprise entre $0.2''$ et $0.75''$. Le temps mis pour enregistrer une image de $170'' \times 120''$ est estimé à 30 s.
- deux raies chromosphériques simultanément : raies $CaII$ à $8542 \text{ \AA}$ et $H\alpha$ à $6563 \text{ \AA}$. La résolution spatiale est de $0.8''$.

Nous avons opté pour un balayage rapide d'un champ de vue de $170'' \times 120''$ dans la raie $H\alpha$ avec une résolution spatiale de $0.25''$. Une image est obtenue en 30 s. Ce mode de fonctionnement est le mieux adapté à l'étude des oscillations de filament de régions actives et pour analyser les variations temporelles du champ magnétique.