

Analyse statistique de points brillants solaires observés par le satellite SOHO

Stéphane RÉGNIER^a, Karine BOCCHIALINI^a, Jean-Claude VIAL^a,
Jean-Pierre DELABOUDINIÈRE^a, William THOMPSON^b

^a Institut d'Astrophysique Spatiale, université Paris XI-CNRS, bât. 121, 91405 Orsay, France
E-mail : bocchialini@ias.fr

^b NASA Goddard Space Flight Center, Code 682, Greenbelt, MD 20771, États-Unis

(Reçu le 7 janvier 1998, accepté le 27 janvier 1998)

Résumé. Les points brillants, structures de petites dimensions et de courte durée de vie, sont constamment présents dans l'atmosphère solaire et pourraient être associés à des reconnections magnétiques, causes possibles du chauffage coronal. Ces structures ont été observées par les instruments coronaux de SOHO et une analyse statistique a été entreprise afin de rechercher la signature de la présence de structures à microéchelle. © Académie des Sciences/Elsevier, Paris

Soleil / points brillants / reconnexion magnétique / chauffage coronal / loi de puissance

Statistical analysis of solar bright points observed with the SOHO spacecraft

Abstract. *Bright points, small and short lifetime structures, appear permanently in the atmosphere and could be associated with magnetic reconnections, potential sources of coronal heating. Such structures have been observed with the coronal instruments on-board SOHO and a statistical analysis was carried out in order to find the signature of very small scale structures. © Académie des Sciences/Elsevier, Paris*

Sun / bright points / magnetic reconnection / coronal heating / power law

Abridged English Version

The mechanisms responsible for the coronal heating and the solar wind acceleration are still not totally understood even if new theories are suggested, such as heating through a velocity filtering (Scudder, 1992; Pierrard and Lemaire, 1996) or magnetic reconnections and magnétohydrodynamic turbulence (Einaudi et al., 1996; Georgoulis and Vlahos, 1996). Theoretical results on instabilities of the magnetic field and the results obtained from self-organized criticality models (Vlahos et al., 1995) show the same properties: the dissipated energy distribution follows a power law.

The energy dissipated in the corona could be due to a continuous accumulation of the magnetic energy localised at small scales preferentially to a large energy dissipation due to isolated events (Vlahos et al., 1995). The bright points could be the signature of such small scales.

The bright points are small magnetic bipoles (Golub et al., 1977; Habbal et al., 1986; Webb et al., 1993) that could be associated to magnetic reconnections. In average, their size varies from 10" to 40" (Habbal et al., 1990; Harvey, 1993), and their lifetime is estimated to 2 to 48 hours (Priest, 1993).

Note présentée par Jean-Claude PECKER.

Bright points have been observed with SUMER and CDS on-board SOHO, in several wavelengths formed at different temperatures, in order to confirm a previous result (Bocchialini et al., 1997) which showed, in only two wavelengths, that the intensity distributions in a bright point follow power laws.

The bright points were observed from 7 to 12 January 1997 in the frame of a joint observing program (JOP38), between EIT (extreme-ultraviolet imaging telescope, see Delaboudinière et al., 1995), CDS (coronal diagnostic spectrometer, see Harrison et al., 1995) and SUMER (solar ultraviolet measurement of emitted radiation, see Wilhelm et al., 1995). EIT was used to select the targets in real time, near the disk center. A large field of view (obtained on January 11, 1997) is shown in *figure 1*. The structures were observed by SUMER in three wavelengths, 770.4 Å and 780.3 Å (Ne VIII formed at 6×10^5 K), and 787.7 Å (O VI formed at 1.5×10^5 K), with a $1'' \times 300''$ fixed slit, 40 s exposure time, during 7 hours which allowed us, thanks to the solar rotation, to build maps of the field of view (*figure 2*). CDS made observations in 6 lines formed from 2×10^4 K to 1.1×10^6 K which are presented in the *table*. The selected region ($102'' \times 240''$) was scanned with a $2'' \times 240''$ slit, during 30 minutes.

The integrated intensity (in relative units) was derived in each line for each spatial pixel, and the contrast between the bright point and its neighborhood was computed, and displayed as a function of the temperature (*figure 3*); the contrast is maximum at 1.5×10^5 K, where O IV is formed. This maximum corresponds to a brightening which could be associated to the location where a magnetic reconnection occurred.

A statistical analysis was performed in each line, in terms of intensity distribution; the histograms (see *figure 4* for an example in the Ne VIII 770.4 Å line) show a gaussian distribution at the lowest intensities and the bright point contribution appears at highest intensities. The histograms are fitted by a χ^2 function and the curves clearly diverge, in the log-log scale plot, defining a threshold which is the limit between the 'background' and the bright point contribution. The intensity distributions due to the bright point follow power laws. The slope of a given power law is associated to the dissipated energy (Lu and Hamilton, 1991; Hudson, 1991; Vlahos et al., 1995). The slopes of each power law obtained in all the observed lines are plotted as a function of the temperature in *figure 5*. The maximum slope (4.8) is reached around 6×10^5 K, in the transition region; Hudson (1991) showed that a significant heating can be provided if the slope of an intensity distribution is at least equal to 4. This result indicates that the bright points could contribute significantly to the coronal heating.

1. Introduction

Parmi les grandes questions que l'on se pose en physique solaire, celles du chauffage de la couche atmosphérique la plus externe – la couronne – et de l'accélération du vent solaire restent plus que jamais d'actualité. La brutale augmentation de température de quelques dizaines de milliers de degrés jusqu'à plusieurs millions de degrés est toujours mal comprise, même si de nouvelles théories sont proposées : sélection des vitesses due à l'existence de fonctions de distribution possédant une queue suprathermique (Scudder, 1992 ; Pierrard et Lemaire, 1996), phénomènes de reconnexion magnétique et de turbulence magnétohydrodynamique (Einaudi et al., 1996 ; Georgoulis et Vlahos, 1996). Dans ce dernier cas, les résultats théoriques sur les instabilités du champ magnétique montrent des propriétés analogues à celles obtenues avec des modèles d'« auto-organisation critique » (*self organized criticality* ou SOC) (Lu et Hamilton, 1991 ; Lu et al., 1993 ; Vlahos et al., 1995), c'est-à-dire que la distribution d'énergie dissipée suit une loi de puissance.

Vlahos et al. (1995) ont montré par l'analyse statistique que l'énergie dissipée par les régions actives seules ne pouvait pas expliquer le chauffage coronal. Dès les années 1980, on a pensé que l'apport d'énergie dans la couronne était dû à l'accumulation continue, localisée, à petite échelle, de l'énergie magnétique plutôt qu'à quelques événements isolés dissipant une grande quantité d'énergie (Vlahos et al., 1995). Les points brillants, structures magnétiques de petites dimensions, pourraient en être une signature.

Les points brillants ont été découverts dans la couronne par la mission Skylab en période de maximum d'activité solaire, et étudiés pour la première fois par Golub et al. (1977). Ce sont de petits dipôles magnétiques (Habbal et al., 1986 ; Webb et al., 1993) qui pourraient être associés à une reconnexion magnétique. Lors d'un minimum d'activité solaire (comme c'est le cas actuellement), ils sont répartis uniformément sur le disque solaire – ils existent dans les trous coronaux comme dans le Soleil calme (Habbal et al., 1990) – et semblent « s'éteindre et s'allumer » de façon aléatoire. Leur taille moyenne varie de 10" à 40" (Habbal et al., 1990) pour l'observation en rayons X, et entre 15" et 30" (Harvey, 1993) pour l'observation en extrême ultraviolet ; leur durée de vie est estimée entre 2 et 48 heures (Priest, 1993).

Une analyse statistique des intensités de ces structures a déjà été entreprise (Bocchialini et al., 1997) et a conduit à la mise en évidence d'une loi de puissance suivie par les distributions d'intensités de deux raies, Le (937 Å) et $S VI$ (944 Å), formées respectivement dans la chromosphère et la région de transition, et observées simultanément. Ce travail est complété ici avec un autre jeu de données, obtenues sur plusieurs points brillants (avec les instruments SUMER et CDS à bord de SOHO) comportant davantage de raies, couvrant une plus grande gamme de températures. Nous avons cherché, d'une part, à déterminer les variations d'intensité d'un point brillant en fonction de la température, et d'autre part, à vérifier sur davantage de longueurs d'onde que la distribution d'intensité suivait une loi de puissance.

2. Observations

Le satellite SOHO (*solar and heliospheric observatory*), lancé en décembre 1995, a pour objectifs scientifiques l'étude de la haute atmosphère solaire et l'étude de l'intérieur du Soleil grâce à l'héliosismologie. Les instruments EIT (*extreme-ultraviolet imaging telescope*), SUMER (*solar ultraviolet measurement of emitted radiation*), et CDS (*coronal diagnostic spectrometer*) font partie de la batterie d'instruments embarqués à bord de SOHO, observant l'atmosphère solaire. Les spectromètres SUMER et CDS observent une large gamme de longueurs d'onde correspondant à des températures de formation différentes, donc à des altitudes différentes, de la chromosphère à la couronne.

L'observation de points brillants s'est faite à l'aide d'un programme commun (JOP38, *joint observing programme*) entre les instruments EIT, SUMER et CDS. Ce programme, mis en œuvre entre le 7 janvier et le 12 janvier 1997, a pour objectif l'étude statistique et le diagnostic de points brillants observés à différentes températures de formation.

2.1. Les données EIT

L'imageur EIT (Delaboudinière et al., 1995) observe le Soleil dans quatre longueurs d'onde différentes : 171 Å (Fe IX, formé dans la basse couronne à $1,3 \cdot 10^6$ K), 195 Å (Fe XII formé dans la basse couronne à $1,6 \cdot 10^6$ K), 284 Å (Fe XV formé dans la haute couronne à $2 \cdot 10^6$ K), et 304 Å (He II formé dans la région de transition à $8 \cdot 10^4$ K). EIT permet d'obtenir des images entières du Soleil, ainsi que des sous-champs permettant de suivre, à des taux de répétition élevés, une structure. C'est en examinant une image EIT obtenue dans la raie à 195 Å, que nous avons pu choisir une structure apparaissant comme un point brillant et ainsi, pointer en temps réel les instruments CDS et SUMER sur cette position (*figure 1*). Pour le 11 janvier 1997, le point brillant à 19:00:00 TU se situe sur le méridien central, aux coordonnées (0", 80"), sa taille est comprise entre 31" et 48", et sa durée de vie minimale est d'environ 5 heures.

2.2. Les données SUMER

L'instrument SUMER (Wilhelm et al., 1995) a été conçu pour étudier les processus dynamiques de la chromosphère à la couronne (de 10^4 à environ 10^6 K). Les observations permettent d'établir des

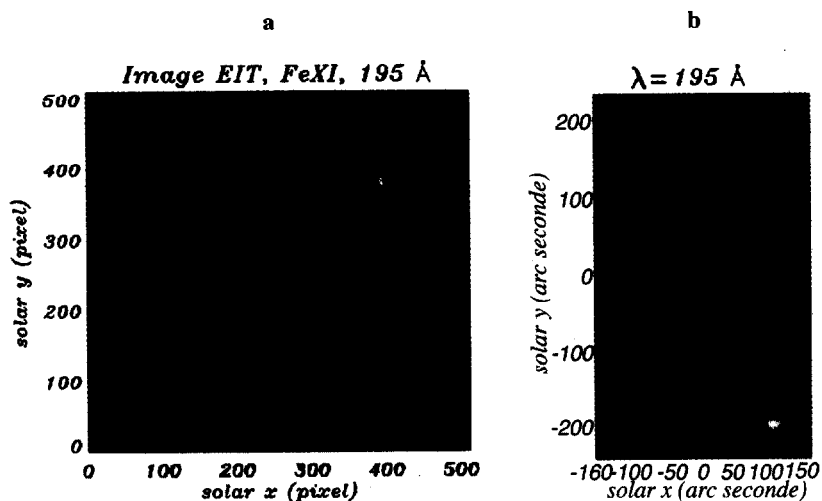


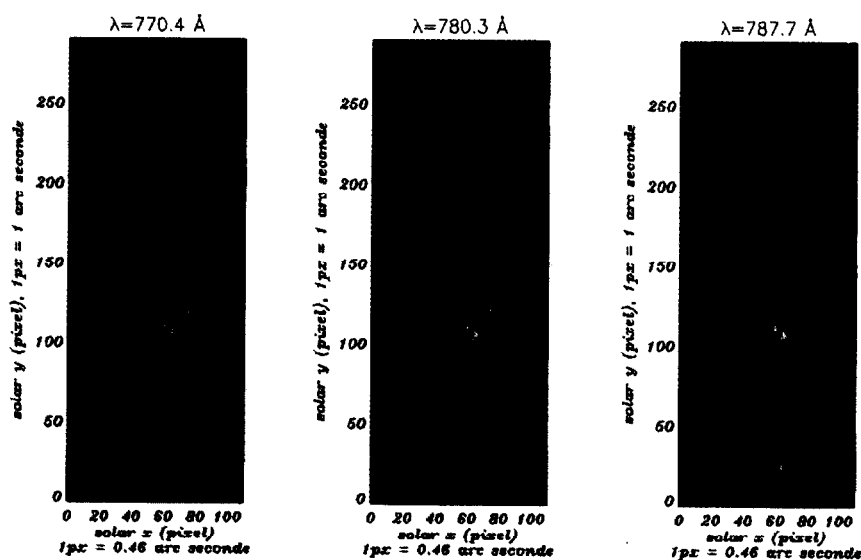
Figure 1. Images obtenues par EIT le 11 janvier 1997 à 195 Å. (a) Soleil entier à 21:00:10 TU ; (b) agrandissement de la région centrée sur le point brillant (0", 80") sélectionné, à 16:25:10 TU.

Figure 1. EIT images obtained on 11 January 1997 (195 Å). (a) Full Sun at 21:00:10 UT; (b) enlarged region centered on the selected bright point (0", 80"), at 16:25:10 UT.

spectres en intensité, des profils de raies en extrême UV, ou des déplacements Doppler avec de très grandes résolutions spatiales (~ 1 seconde d'arc), spectrales (entre 20 et 50 mÅ) et temporelles (~ 1 s). Les données que nous avons utilisées contiennent trois longueurs d'onde : 770,4 et 780,3 Å pour le Ne VIII formé à $6 \cdot 10^5$ K dans la région haute de la transition chromosphère/couronne (TCC), et 787,7 Å pour l'O IV formé à $1,5 \cdot 10^5$ K dans la région basse de la TCC. Elles ont été obtenues avec une fente fixe de $1'' \times 300''$ et un temps de pose de 40 s, pendant 7 heures. La structure visée a dérivé sous la fente, compte tenu de la rotation solaire ; il est donc possible de reconstituer des cartes comme celles de la *figure 2* du 11 janvier 1997.

Figure 2. Cartes obtenues par SUMER le 11 janvier 1997, aux trois longueurs d'onde 770,4, 780,3, et 787,7 Å ; le point brillant est situé à (60 px, 110 px).

Figure 2. SUMER maps on 11 January 1997 at three wavelengths: 770.4, 780.3, 787.7 Å; the bright point is at (60 px, 110 px).



2.3. Les données CDS

Le spectromètre CDS (Harrison et al., 1995) permet d'étudier l'atmosphère solaire à partir de profils de raies. Les données obtenues regroupent 19 longueurs d'onde (de l'He I formé dans la basse région de transition, jusqu'au Fe XIX formé dans la haute couronne). La région sélectionnée (102" × 240") a été balayée, d'est en ouest, avec une fente de 2" × 240" et un pas de 2", pendant 30 minutes. L'ensemble des longueurs d'onde utilisées est récapitulé dans le *tableau*.

Tableau. Ensemble des longueurs d'onde analysées, des éléments correspondants, des températures et des régions de formation, et des instruments utilisés au cours des observations.

Table. List of the analysed wavelengths, the corresponding elements, their temperatures and regions of formation, and the instruments used during the observing sequence.

λ (Å)	Élément	Température (K)	Altitude	Instrument
195	Fe XII	$1,6 \cdot 10^6$	Couronne	EIT
520,65	Si XII	$1,9 \cdot 10^6$	Couronne	CDS
562,83	Ne VI	$4 \cdot 10^5$	Région de transition	CDS
584,39	He I	$2 \cdot 10^4$	Chromosphère	CDS
599,51	O III	$9 \cdot 10^4$	Région de transition	CDS
624,94	Mg X	$1,1 \cdot 10^6$	Couronne	CDS
629,74	O V	$2,5 \cdot 10^5$	Région de transition	CDS
770,4	Ne VIII	$6 \cdot 10^5$	Région de transition	SUMER
780,3	Ne VIII	$6 \cdot 10^5$	Région de transition	SUMER
787,7	O IV	$1,5 \cdot 10^5$	Région de transition	SUMER

3. Variation de l'intensité d'un point brillant en fonction de la température

Nous allons nous intéresser à l'importance relative (contraste) de l'intensité du point brillant observé le 11 janvier 1997, en fonction de l'altitude de formation de l'ion considéré dans l'atmosphère solaire. Nous avons donc utilisé les raies SUMER et CDS qui figurent dans le *tableau*. L'importance relative I_R (dans une raie donnée) du point brillant sélectionné nous est donnée par :

$$I_R = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{moy}} - I_{\min}}$$

où I_{\max} est l'intensité maximale de la région balayée, donc l'intensité moyenne du point brillant ; I_{moy} et I_{\min} sont respectivement l'intensité moyenne et l'intensité minimale de la région balayée.

La *figure 3* représente la variation de l'intensité relative en fonction de la température et nous montre qu'il existe une température ($\sim 1,5 \cdot 10^5$ K), où le point brillant a une intensité relative maximale.

Selon Harvey (1993), les points brillants sont associés à de petits dipôles magnétiques ; il est alors possible que l'embranchement observé corresponde à une superposition de reconnexions magnétiques. Dans ce cas, nous pouvons en conclure que cette reconnexion a lieu à une altitude assez basse correspondant au pic de contraste.

4. Analyse statistique

À partir de l'ensemble des cartes CDS et SUMER et d'une analyse statistique, nous avons établi la variation de l'intensité des points brillants observés, en fonction de l'altitude de formation dans

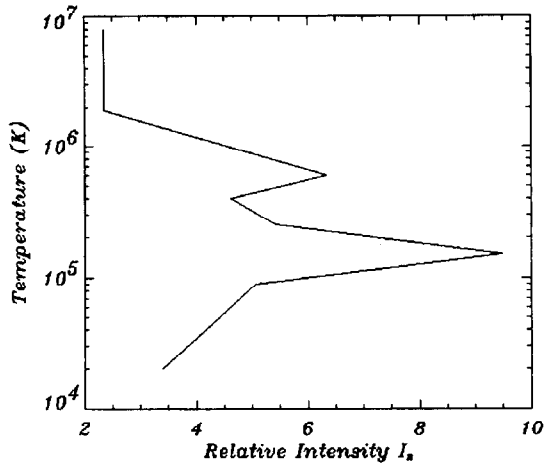


Figure 3. Variation de l'intensité relative en fonction de la température de formation de raie.

Figure 3. Variation of the relative intensity as a function of the temperature of line formation.

l'atmosphère solaire de l'ion considéré. Nous avons commencé par évaluer la distribution du nombre de pixels de la totalité des cartes, associé à un intervalle d'intensité donnée, pour chaque longueur d'onde. Un exemple de distribution est présenté figure 4a ; on peut noter que la majorité des intensités sont réparties selon un pic en χ^2 , en première approximation, et que les hautes intensités – associées au point brillant – se détachent en formant une queue étendue. Nous avons donc ajusté cette distribution avec une distribution χ^2 :

$$f_{\chi^2}(x) = \frac{A}{2 \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \left(\frac{x}{2}\right)^{\frac{n}{2}-1} \exp\left(-\frac{x}{2B}\right)$$

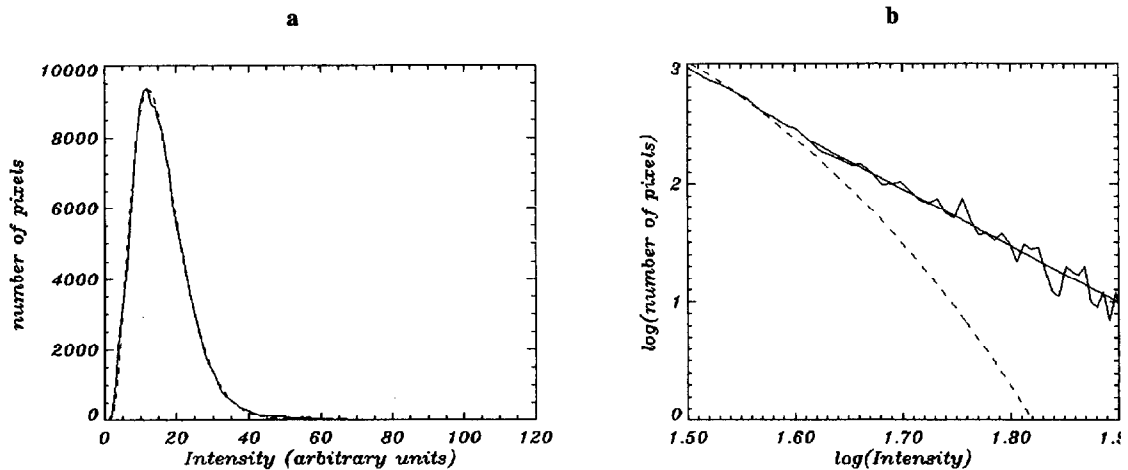


Figure 4. (a) Distribution de l'intensité de l'ensemble des cartes SUMER (du 7 au 12 janvier 1997) dans la raie Ne VIII (770,4 Å), et la distribution χ^2 associée en pointillés (avec $n = 4$) ; (b) diagramme log-log de la distribution des hautes intensités, la distribution χ^2 associée en pointillés, et la droite de pente $\gamma = -4,77$ associée ($I_{\text{seuil}} = 40$).

Figure 4. (a) Intensity distribution of SUMER maps in Ne VIII (770.4 Å), from 7 to 12 January 1997, and the χ^2 fitting curve in dashed line (obtained with $n = 4$) ; (b) Log-log plot of the intensity distribution of the highest intensities, the fitting χ^2 distribution in dashed line, and the fitting plot with $\gamma = -4.77$ ($I_{\text{threshold}} = 40$).

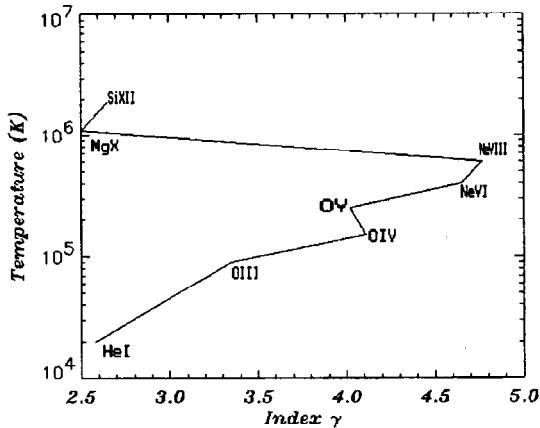


Figure 5. Variation de la pente γ (caractéristique de l'énergie dissipée) en fonction de la température de formation de raie.

Figure 5. Variation of γ (characteristic of the energy release) as a function of the temperature of line formation.

(avec n qui varie selon les distributions étudiées et qui est en général compris entre 1 et 50), ce qui a permis de trouver une intensité seuil au-dessus de laquelle la distribution et l'ajustement divergent. Les intensités situées au-dessus de ce seuil sont représentatives du point brillant. Le graphique de la *figure 4b* montre plus clairement cette même distribution en échelle log-log, et en ayant seulement pris en compte les intensités supérieures à l'intensité seuil. La distribution est parfaitement ajustée par une droite de pente γ . Les intensités du point brillant suivent donc une loi de puissance. Lu et Hamilton (1991), Hudson (1991) et Vlahos et al. (1995) ont montré que la pente γ était caractéristique de l'énergie dissipée dans l'atmosphère solaire, c'est-à-dire que lorsque la valeur absolue de γ augmente, l'énergie dissipée augmente également. Nous avons appliqué le même procédé d'analyse statistique aux données SUMER (la statistique s'effectue sur $\sim 150\,000$ px) et aux données de CDS (He I, O III, O V, Ne VI, Mg X et Si XII avec une statistique de $\sim 30\,000$ px). Le calcul des pentes réalisé pour toutes ces raies nous a conduits à la *figure 5* où apparaissent les variations de la pente γ en fonction de la température. Nous pouvons remarquer que γ est maximal pour $6 \cdot 10^5$ K ; donc l'énergie dissipée est probablement maximale dans cette région. On notera que le maximum est obtenu ici à une température plus élevée que dans le cas du contraste maximal (*figure 3*), mais que ces températures restent représentatives de la région de transition. Il y a certainement là une information qui reste à établir, sur la relation entre le lieu de la reconnexion et les embrillancements observés.

5. Discussion – conclusion

Nous avons présenté les résultats d'une analyse statistique menée sur des observations de points brillants, réalisées avec les instruments du satellite SOHO. Plusieurs de ces structures, visibles à diverses longueurs d'onde, ont été observées entre le 7 et le 12 janvier 1997, simultanément par SUMER et CDS, dans des raies formées entre $2 \cdot 10^4$ et $2 \cdot 10^6$ K. D'une part, nous nous sommes intéressés à la variation de l'intensité relative du point brillant observé le 11 janvier 1997 par rapport à l'intensité moyenne de la région balayée : l'embrillancement relatif est maximal autour de $1,5 \cdot 10^5$ K, dans la région de transition ; on peut en déduire que si le point brillant est le résultat d'une reconnexion magnétique, cette reconnexion a lieu à une altitude relativement basse dans la région de transition. D'autre part, à la suite de l'évaluation de la répartition des intensités dans la région balayée, nous avons confirmé le résultat (déjà établi pour deux longueurs d'ondes formées à des températures différentes) selon lequel les distributions d'intensités dans les points brillants suivent une loi de puissance dont la

penne varie selon la longueur d'onde analysée, de $-2,6$ à $-4,8$, cette dernière valeur étant obtenue autour de $6 \cdot 10^5$ K. L'analyse statistique théorique des régions actives (Vlahos et al., 1995) donne des lois de puissance dont les exposants sont compris entre $-1,8$ pour les hautes énergies (dans les microéruptions et les éruptions), et $-3,5$ pour des énergies moindres (dans les nanoéruptions) ; cette dispersion s'explique dans la mesure où les petits événements sont associés à de plus basses énergies, mais sont plus nombreux. Dans le cas des nanoéruptions, Hudson (1991) a montré que des pentes d'au moins -4 étaient nécessaires dans les distributions en intensité pour contribuer de façon significative au chauffage coronal, ce qui n'avait pas été observé. Grâce aux hautes résolutions des instruments CDS et SUMER, il a été possible de trouver des pentes inférieures ou égales à -4 dans les distributions en intensité dans les points brillants. Malgré leur faible taille et leur durée de vie courte, les points brillants semblent donc être des ingrédients importants dans le chauffage de la couronne.

Remerciements. Le projet SUMER est soutenu financièrement par « DARA, CNES, NASA et ESA Prodex program (Swiss contribution) ». SOHO est une mission internationale de coopération entre l'ESA et la NASA. Les auteurs souhaitent remercier J.-C. Pecker qui a accepté de présenter cette note, M. Georgoulis pour les nombreuses discussions sur la théorie du SOC, ainsi que les observateurs des instruments EIT et CDS qui ont participé au JOP38. Le support des équipes EIT, CDS et SUMER à l'EOF est apprécié.

Références bibliographiques

- Bocchialini K., Vial J.-C., Einaudi G., 1997. Statistical Analysis of a Bright Point observed simultaneously in two Chromospheric and Transition Region lines by SUMER, 5th SOHO Workshop, ESA Report, SP-404, 211–215.
- Delaboudinière J.-P. et al., 1995. EIT: extreme-ultraviolet imaging telescope for the SOHO Mission, Sol. Phys. "The SOHO Mission", 162, 291–312.
- Einaudi G., Velli M., Politano H., Pouquet A., 1996. Energy release in a turbulent corona, Ap. J., 457, L113–L116.
- Georgoulis M.K., Vlahos L., 1996. Statistical properties of magnetic activity in the solar corona, Ap. J., 469, L135.
- Golub L., Krieger A.S., Harvey J.W., Vaiana G.S., 1977. Magnetic properties of X-ray bright points, Sol. Phys., 53, 111–121.
- Habbal S.R., Ronan R.S., Withbroe G.L., Shevgaonkar R.K., Kundu M.R., 1986. Solar coronal bright points observed with the VLA, Ap. J., 306, 740–750.
- Habbal S.R., Withbroe G.L., Dowdy J.F., 1990. A comparison between bright points in a coronal hole and a quiet Sun region, Ap. J., 352, 333–342.
- Harrison R.A. et al., 1995. The coronal diagnostic spectrometer for the solar and heliospheric observatory, Sol. Phys. "The SOHO Mission", 162, 233–290.
- Harvey K., 1993. Magnetic Bipoles on the Sun, Ph.D. Thesis, University of Utrecht, The Netherlands, 331 p.
- Hudson H., 1991. Solar flares, microflares, nanoflares and coronal heating, Sol. Phys., 133, 357–369.
- Lu E.T., Hamilton R.J., 1991. Avalanches and the distribution of the solar flares, Ap. J., 380, L89–L92.
- Lu E.T., Hamilton R.J., McTiernan J.M., Bromund K.R., 1993. Solar flares and avalanches in driven dissipative systems, Ap. J., 412, 841–852.
- Pierrard V., Lemaire J., 1996. Lorentzian ion exosphere model, J. Geophys. Res., 101, N A4, 7923–7934.
- Priest E.R., 1993. Coronal heating by MHD turbulence, in magnetic turbulence and transport, in: Hennequin P., Dubois M. Eds, Cargèse Workshop "Magnetic Turbulence and Transport", 203–228.
- Scudder J., 1992. Why all stars should possess circumstellar temperature inversions, Ap. J., 398, 319–349.
- Vlahos L., Georgoulis M.K., Kluiving R., Paschos P., 1995. The statistical flare, A. & A., 299, 897–911.
- Webb D., Martin S.F., Moses D., Harvey J.W., 1993. The correspondence between X-ray bright points and evolving magnetic features in the quiet sun, Sol. Phys., 144, 15–35.
- Wilhelm K. et al., 1995, SUMER – solar ultraviolet measurements of emitted radiation, Sol. Phys. "The SOHO Mission", 162, 189–231.