

Le Soleil dans tous ses états

Thierry DUDOK DE WIT

Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement
CNRS et Université d'Orléans, 3A avenue de la Recherche Scientifique,
45071 Orléans, France
ddwit@cnrs-orleans.fr

Résumé – L'observation du Soleil est présentée sous l'angle des méthodes de traitement du signal et d'image. L'accent est mis sur quelques récents développements et sur les problèmes rencontrés dans leur mise en oeuvre.

Abstract – Solar observations are presented from the viewpoint of signal and image processing. The focus is put on recent developments and on key issues.

Introduction

Le Soleil est un objet paradoxal. C'est l'étoile la plus proche de la Terre, et pourtant les astres lointains ont suscité bien plus de vocations dans ce qui concerne la traitement du signal et des images [1]. De même, le nombre de taches solaires est une des séries temporelles les plus étudiées au monde, alors qu'elle dissimule encore bien des secrets.

Les données solaires sont fortement contraintes par les instruments, qui sont généralement embarqués à bord de satellites afin d'échapper aux perturbations atmosphériques. Il en résulte diverses complications, dont la perte d'information engendrée par la compression des données. Le principal problème est celui de la résolution. Si certains appareils offrent une bonne résolution temporelle ou une bonne résolution spatiale (ou spectrale), il est très rare d'avoir les deux à la fois.

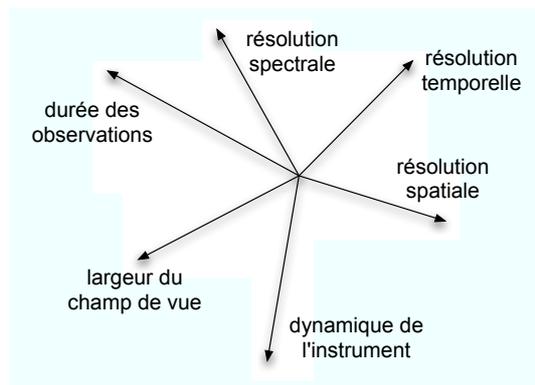


FIG. 1 – Quel axe faut-il favoriser dans l'observation solaire ? (d'après un dessin de J.-F. Hochedez)

Nous vivons aujourd'hui à une époque charnière, car la course aux hautes résolutions oblige à faire des choix : les améliorations peuvent se faire selon plusieurs axes, cf. Fig. 1, mais tout développement disproportionné d'un axe se traduira par un effet d'*aliasing*. Aujourd'hui se pose donc

le problème du pavage de l'espace représenté dans la Fig. 1. Quelle sera, par exemple, la meilleure stratégie pour fusionner des images haute résolution mais à faible cadence temporelle avec des images basse résolution à haute cadence d'observation ?

J'ai choisi de décrire ici quelques problématiques récentes à partir d'une sélection (forcément biaisée) d'axes de la Fig. 1.

La dimension temporelle

Le Soleil est bien connu pour son nombre de taches solaires, dont la série temporelle (une mesure journalière depuis 1818) avec sa périodicité d'environ 11 ans est devenue un cas d'école.

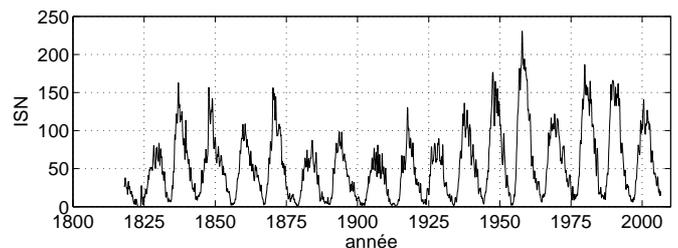


FIG. 2 – Le nombre de taches solaires, moyenné sur trois mois.

La prévision de l'amplitude des prochains cycles n'est plus un problème académique car il présente désormais aussi des enjeux économiques. De nombreux articles ont été consacrés à ce problème [2], qui fait d'ailleurs l'objet d'une compétition [3]. Des modèles physiques permettent aujourd'hui de prédire l'activité solaire jusqu'à deux cycles à l'avance. Divers indicateurs tels que les exposants de Lyapunov suggèrent l'existence de chaos déterministe, mais les observations sont aussi compatibles avec une résonance stochastique [4]. La série semble trop courte et trop bruitée pour conclure. On oublie souvent de mentionner que cette série représente en réalité la valeur

absolue $|R(t)|$ d'une variable $R(t)$ dont le véritable cycle est de 22 ans, et que la construction même du nombre de taches solaires prête à critique. Une étude intéressante [5] a cependant montré qu'il est possible de lever l'indétermination liée à la valeur absolue et de dresser un parallèle entre les propriétés topologiques de l'attracteur observé et celui de Rössler.

Parmi les autres séries temporelles intéressantes, je noterai toutes celles qui se rapportent à la libération d'énergie par des éruptions solaires. Ces dernières se produisent à toutes les échelles. De nombreuses observations ont révélé les signatures d'une criticalité auto-organisée [6], avec des lois de puissance et aussi des fortes similitudes avec la turbulence observées dans les fluides. Il existe ici un lien intéressant entre la structure spatiale et la dynamique temporelle. Pour étudier les éruptions, il faut une bonne résolution spatiale. Or la taille des plus petites éruptions reste très en-deçà de la résolution des instruments. On cherche donc à compenser ce manque d'information par une augmentation de la résolution temporelle (en moyennant sur le Soleil entier, donc sans résolution spatiale). La densité spectrale de puissance tend alors à suivre une loi de puissance. Pendant longtemps, il était question de savoir si cette loi résultait de la superposition d'événements indépendants, ou si des interactions à longue portée pouvaient intervenir. L'analyse de la distribution des temps d'attente entre éruptions successives a permis de lever cette indétermination, et de révéler l'existence de processus de Lévy, avec une longue mémoire temporelle [7].

Une nouvelle voie de recherche est l'étude de la fonction de transfert entre les observables solaires et des paramètres de l'environnement terrestre. Il existe en effet de nombreux mécanismes d'interaction, souvent non-linéaires, avec des échelles de temps très disparates. Existe-t-il par exemple des invariants qui permettent d'établir un lien causal entre telle variable solaire et telle observation terrestre? [8] Comme toutes ces quantités sont modulées en phase par le cycle d'activité solaire, il est très difficile d'établir des liens de causalité. On peut en revanche utiliser des outils issus de la théorie des graphes (comme la *multidimensional scaling*, déjà couramment utilisée en génomique) pour étudier la proximité entre des observables à partir d'une mesure de similarité entre celles-ci [9].

Une autre application fascinante est l'héliosismologie. Le Soleil possède un vaste spectre de modes propres, qui sont principalement excités par la turbulence et dont la fréquence permet de sonder les profondeurs de l'astre, comme en sismologie terrestre. Il est aujourd'hui possible de localiser des régions turbulentes sur la face cachée du Soleil rien qu'à partir de mesures locales des ondes de pression [10].

Voir le Soleil dans le plan

Les premières images du Soleil remontent aux débuts de la photographie, mais il aura fallu attendre les années 1985 pour obtenir les premières images de haute qualité, prises depuis l'espace. La majeure partie du spectre solaire ne peut s'observer qu'en dehors de l'atmosphère terrestre. Les satellites actuels sont équipés de caméras CCD à haute ré-

solution qui offrent parfois plusieurs bandes spectrales; ils délivrent des volumes de données considérables (dizaines de téra-octets par jour), ce qui pose aussi le problème du *data mining*.

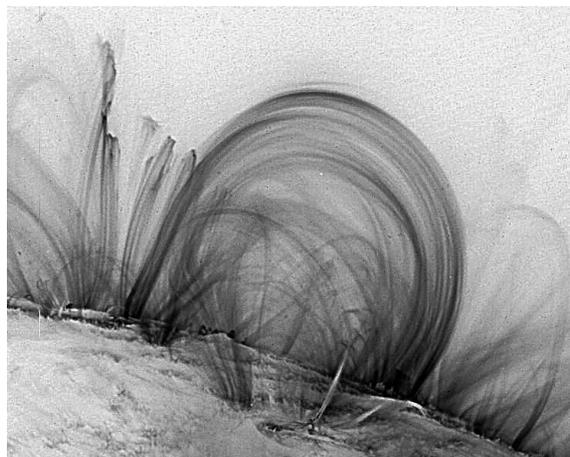


FIG. 3 – Observation du bord supérieur du Soleil dans l'ultraviolet, révélant de nombreuses boucles magnétiques imbriquées (satellite TRACE).

Les images du Soleil révèlent des structures à toutes les échelles, dont la forme souvent complexe reflète la topologie du champ magnétique, cf. Fig. 2. Il est très rare d'avoir directement accès aux paramètres physiques fondamentaux (densité, température, ...); l'interprétation de ces images est donc ardue et s'apparente plus souvent à un exercice de zoologie qu'à une réelle analyse quantitative.

La mode est aujourd'hui au multispectral et au multiéchelle. La transformation continues en ondelettes (chapeau mexicain ou à trous) est aujourd'hui principalement utilisée pour identifier et analyser des structures solaires [11, 12]. L'analyse multiéchelle est aussi utile pour extraire le bruit omniprésent qui résulte généralement d'un mélange de bruit de Poisson et d'un aliasing spatial. Les caractéristiques de ce bruit ressemblent hélas fort à celles de petites structures spatiales, qui sont justement d'un grand intérêt. Une stratégie consiste ici à utiliser la régularité locale (coefficient de Lipschitz) pour discriminer puis extraire le bruit [13]. La connaissance de ce type de bruit permet aussi de concevoir des schémas de compression qui préservent mieux les caractéristiques des images [14].

Les transformations discrètes se font pour l'instant ...discrètes, alors même que les curvelets et les ridgelets présentent un énorme potentiel pour étudier et extraire des boucles magnétiques. Leur utilisation se résume pour l'instant à du débruitage et à de l'amélioration du contraste [15].

A ceci on peut associer de nombreuses études pour estimer la dimension fractale, le spectre des singularités, etc. [16, 17]. Le champ magnétique étant lui-même souvent fractal, il n'est pas étonnant de retrouver cette signature dans des images 2D. La dimension fractale pourra peut-être même servir un jour à des fins opérationnelles, étant donné que son augmentation juste avant une éruption so-

laire peut servir de signe précurseur. Tous ces indicateurs topologiques ont été développés pour des quantités scalaires positives, et il serait intéressant de disposer d'outils qui prennent en compte la nature signée ou vectorielle des observables.

Une évolution récente vient à point pour bousculer ces habitudes. La météorologie de l'espace est une discipline nouvelle qui s'intéresse à la prévision de l'activité solaire et à ses effets sociétaux (impacts sur les télécommunications, irradiation des astronautes et du personnel navigant dans les avions, réseaux électriques perturbés, ...). Pour cela, il faut non seulement observer en permanence mais surtout identifier et savoir caractériser automatiquement des formes. Un tournant est donc en train de s'opérer, et le recours à des indicateurs empiriques est de plus en plus encouragée, du moment que cela permet d'améliorer les prévisions.

La reconnaissance de forme a démarré avec l'identification automatique de taches solaires. Ceci est relativement aisé car il suffit de faire un simple seuillage en intensité sur des images solaires. L'identification des structures plus complexes est un problème plus récent et nettement plus ardu [18]. On y rencontre des techniques de segmentation et de clustering [19], mais aussi des systèmes experts pour brasser des métadonnées. Différents exemples peuvent être trouvés dans [20].

Il est aujourd'hui question d'intégrer certains de ces outils dans les processeurs à bord du satellite, afin d'améliorer la stratégie d'observation. Un aspect intéressant est le recours au filtrage de Kalman pour combiner de manière astucieuse les informations provenant de divers instruments dont la cadence et le mode d'opération peuvent être très différents.

Voir le Soleil dans l'espace

Les observations en 3D du Soleil ont réellement démarré en octobre 2006, avec le lancement des deux satellites STEREO, qui observent le Soleil sous un angle qui passera progressivement de 0 à 360 deg. STEREO permettra enfin d'étudier la structure tri-dimensionnelle de phénomènes solaires et du milieu interplanétaire. Le recours à des techniques de tomographie semble hélas exclue car l'observation de structures optiquement minces (translucides) sous deux angles est un problème inverse trop mal posé. Même les tentatives pour reconstruire des formes simples avec des techniques d'inversion basées le minimum de complexité (par exemple la méthode Pixon [21]), échouent par manque de contraintes. La meilleure solution reste dans ce cas le *forward modelling*, dans lequel un modèle physique est ajusté aux observations.

En revanche, la reconstruction en 3D de structures bi-ou mono-dimensionnelles très contrastées (boucles magnétiques, ...) et vues sous un faible angle, commence à livrer ses premiers résultats. On trouve ici des méthodes automatiques telles que le flot optique [22] et l'appariement d'images par corrélation locale [23], qui permettent d'analyser des structures quelconques. Ces méthodes font toutes appel à des schémas multiresolution pour adapter localement le domaine d'étude à la taille de la structure

solaire. Le résultat est cependant souvent ambigu, même après intégration de la contrainte épipolaire. Pour étudier des boucles comme celles illustrées dans la Fig. 3, on gagne beaucoup à coupler les outils de triangulation à des modèles physiques qui tiennent compte de la topologie du champ magnétique [24].

Plusieurs dimensions simultanément

L'analyse de données multivariées (par exemple spatio-temporelles) se résume souvent encore à une juxtaposition d'images ou à des animations. Le traitement de cubes de données tend aujourd'hui à se généraliser, alors même qu'il existe très peu d'outils adaptés.

Une première approche consiste à utiliser des méthodes de séparation aveugle de sources pour obtenir une combinaison linéaire de modes séparables par des techniques telles que la décomposition en valeurs singulières [25] ou l'analyse par composantes indépendantes [26, 27]. Pour une variable spatio-temporelle $I(\mathbf{x}, t)$, par exemple, on aurait $I(\mathbf{x}, t) = \sum_k f_k(\mathbf{x})g_k(t)$. Ces méthodes ont dans certains cas permis d'identifier de manière statistique des régimes dynamiques différents ou des structures morphologiques distinctes. Le manque de données est cependant un problème récurrent. Pour les données spatio-temporelles, par exemple, le nombre de pixels est souvent très supérieur au nombre d'événements, ce qui fausse la moyenne d'ensemble. En outre, les hypothèses sous-jacentes (par exemple l'orthogonalité pour le cas de la SVD) sont souvent peu compatibles avec la nature des processus étudiés. Ceci reste cependant un champ très prometteur. Ainsi, une méthode Bayésienne de séparation en sources positives [28] a récemment permis de montrer que le spectre solaire dans l'ultraviolet peut être décomposé en une somme de spectres de référence [29].

Une seconde approche consiste à ajuster aux cubes de données des modèles paramétriques comme avec la transformation de Hough. Cette dernière est aujourd'hui couramment utilisée pour détecter des structures qui se détachent du Soleil [30]. Un outil opérationnel a même été développé [31].

Un problème rarement mentionné ici est le manque de stationnarité. Nombreux sont en effet les jeux de données à souffrir de manque de stationnarité. La cyclostationnarité figure certainement parmi les propriétés à explorer.

Pour conclure

La complexité et la richesse du Soleil tiennent à mon avis à la multiplicité des axes dans la Fig. 1. Aucun d'eux ne peut être négligé. L'avenir appartient surtout aux outils qui arrivent soit à conjuguer harmonieusement différents axes soit à nous renseigner sur un axe par l'étude détaillée d'un autre axe.

Remerciements : je tiens à remercier les très nombreux collègues qui m'ont fourni des données et/ou avec lesquels j'ai pu avoir des discussions.

Références

- [1] J.-L. Starck et F. Murtagh, *Astronomical Image and Data Analysis*, Springer, Berlin, 2ème édition (2006).
- [2] D. H. Hathaway, R. M. Wilson, et E. J. Reichmann, *A synthesis of solar cycle prediction techniques*, J. Geophysical Research, 104 (1999) 22375–22388.
- [3] <http://www.sec.noaa.gov/SolarCycle/SC24/>
- [4] P. D. Mininni, D. O. Gómez, et G. B. Mindlin, *Stochastic relaxation oscillator model for the solar cycle*, Phys. Rev. Lett., 85 (2000) 5476–5479.
- [5] C. Letellier, L. Aguirre, J. Maquet, et R. Gilmore, *Evidence for low dimensional chaos in sunspot cycles*, Astronomy & Astrophys., 449 (2006) 379–387.
- [6] G. Boffetta, V. Carbone, P. Giuliani, P. Veltri et A. Vulpiani, *Power laws in solar flares : self-organised criticality or turbulence ?* Phys. Rev. Lett., 83 (1999) 4662–4665.
- [7] F. Lepreti, V. Carbone, et P. Veltri, *Solar Flare Waiting Time Distribution : Varying-Rate Poisson or Lévy Function ?* Astrophysical J., 555 (2001) L133–L136.
- [8] K. Kiyani, S. C. Chapman, B. Hnat, et R. M. Nicol, *Self-similar signature of the active solar corona within the inertial range of solar wind turbulence*, <http://www.arxiv.org/pdf/physics/0702123> (2007).
- [9] T. Dudok de Wit, J. Liliensten, J. Abouadarham, P.-O. Amblard et M. Kretzschmar, *Retrieving the solar EUV spectrum from a reduced set of spectral lines*, Annales Geophysicae 23 (2005) 3055–3069.
- [10] L. Gizon et A. Birch, *Local helioseismology*, Living Rev. Solar Phys. 2, (2005), 6, <http://www.livingreviews.org/lrsp-2005-6>
- [11] V. Delouille, J. de Patoul, J.-F. Hochedez, L. Jacques, et J.-P. Antoine, *Wavelet spectrum analysis of Eit/Soho images*, Solar Physics, 228 (2005) 301–321.
- [12] A. C. Katsiyannis, F. Murtagh et F. P. Keenan, *The application of à trous wave filtering and Monte Carlo analysis on Secis 2001 solar eclipse observations*, Solar Physics, 228 (2005) 323–338.
- [13] J.-F. Hochedez, L. Jacques, S. Gissot, et J.-P. Antoine, *The finest features in EUV solar images*, Solar Image Recognition Workshop, Brussels, 2003, <http://sol.oma.be/SIRW/>
- [14] B. Nicula, D. Berghmans, et J.-F. Hochedez, *Poisson recoding of solar images for enhanced compression*, Solar Physics, 228 (2005) 253–264.
- [15] G. Stenborg et P. J. Cobelli, *A wavelet packets equalization technique to reveal the multiple spatial-scale nature of coronal structures*, Astronomy & Astrophys., 398 (2003) 1185–1193.
- [16] E. Nesme-Ribes, N. Meunier, et B. Collin, *Fractal analysis of magnetic patterns from Meudon spectroheliograms*, Astronomy & Astrophys. 308 (1996) 213–218.
- [17] R. T. J. McAteer, P. Gallagher, et J. Ireland, *Statistics of active region complexity : a large-scale fractal dimension survey*, Astrophysical J., 631 (2005) 628–635.
- [18] V. Zharkova, S. Ipson, A. Benkhalil et S. Zharkov, *Feature Recognition in Solar Images*, Artificial Intelligence Rev., 23 (2005) 209–266.
- [19] V. Barra, V. Delouille, et J.-F. Hochedez, *Segmentation of extreme ultraviolet solar images via multi-channel fuzzy clustering*, J. Advances Space Research (2007) sous presse.
- [20] Numéro spécial 238 de Solar Physics (2005). Voir aussi les comptes-rendus des Solar Image Processing Workshops, <http://www.solarmonitor.org/sipworkiii/>.
- [21] J. S. Newmark, J. Cook, P. Reiser, et A. Thernisien, *Comparison of tomographic and forward modeling 3D reconstructions of a coronal streamer*, American Geoph. Union fall meeting (2004), paper SH21B-0421.
- [22] S. Gissot et J.-F. Hochedez, *Multiscale optical flow probing of dynamics in solar EUV images*, Astronomy & Astrophys. 464 (2007) 1107–1118.
- [23] T. Dudok de Wit, *Stereoscopic reconstruction of solar images by local correlation*, Solar Image Recognition Workshop, Brussels, 2003, <http://sol.oma.be/SIRW/>
- [24] T. Wiegmann et B. Inhester, *Magnetic stereoscopy*, Solar Physics 236 (2006) 25–40.
- [25] A. Vecchio, V. Carbone, et al., *Proper orthogonal decomposition of solar photospheric motions*, Phys. Rev. Lett., 95 (2006) doi 10.1103/PhysRevLett.95.061102
- [26] A. C. Cadavid, J. K. Lawrence, D. P. McDonald, et A. Ruzmaikin, *Independent global modes of solar magnetic field fluctuations*, Solar Physics, 226 (2005), 359–376.
- [27] T. Dudok de Wit et F. Auchère, *Multispectral analysis of solar EUV images : inferring temperature from morphology*, Astronomy & Astrophys. 466 (2007) 347–355.
- [28] S. Moussaoui, D. Brie, A. Mohammad-Djafari, et C. Carteret, *Separation of non-negative mixture of non-negative sources using a Bayesian approach and MCMC sampling*, IEEE Trans. Sig. Proc. 11 (2006) 4133–4145.
- [29] P.-O. Amblard et S. Moussaoui, *Un Soleil égale trois Soleils*, actes de ce colloque.
- [30] E. Robbrecht et D. Berghmans, *Entering the era of automated CME detection : a review of existing tools*, Solar Physics, 228 (2005) 239–251.
- [31] <http://sidc.oma.be/cactus/>