# L'IRRADIANCE SOLAIRE ET SES VARIATIONS

## PAR PAUL CHARBONNEAU, ASHLEY CROUCH, ET KEN TAPPING

'irradiance solaire totale est définie comme la quantité d'énergie radiative originant du soleil, intégrée sur toute les longueurs d'onde, incidente sur un mètre carré de la haute atmosphère terrestre lorsque la terre est située à exactement une unité astronomique  $(1.496 \times 10^8 \text{ km})$  du soleil. Bien que les premières mesures de cette quantité fondamentale remontent au dix-neuvième siècle, ce n'est que depuis une trentaine d'années que les radiomètres et bolomètres spatiaux ont atteint une stabilité suffisante pour en détecter les variations d'une manière fiable sur de longues échelles de temps.

La Figure 1 présente les variations observées de l'irradiance depuis 1978 (traits bleus). Cette séquence temporelle est en fait un composite de mesures provenant de plusieurs instruments différents <sup>[1]</sup>. On y voit l'irradiance varier sur des échelles de temps allant de quelques heures jusqu'à la décennie. Cette dernière variation est en phase avec le cycle de l'activité magnétique du soleil, mieux connu en termes de la variation quasi-cyclique du nombre de taches solaires observées sur le soleil (voir Figures 2 et 3). Ceci suggère que les fluctuations de l'irradiance sont associées à celles du champ magnétique solaire, dont les taches solaires sont un indicateur facilement observable.

Deux classes d'explications ont été avancées pour expliquer les fluctuations de l'irradiance. La première y voit une simple conséquence de la variation, en fonction du

#### Résumé

Nous décrivons ici une procédure de modélisation des variations de l'irradiance solaire associées au cycle d'activité magnétique. Notre approche, basée sur un modèle physique simple plutôt que sur des corrélations statistiques établies sur des bases purement observationnelles, permet en principe une reconstruction physiquement fiable des variations de l'irradiance durant les siècles passés. Nous présentons une reconstruction remontant jusqu'à 1874, incluant une modulation à long terme de l'irradiance de la partie non-magnétisée de la photosphère solaire, cette modulation étant calculée à l'aide d'un modèle semi-empirique de la variation du flux magnétique total à l'intérieur du soleil établi à l'aide des archives du flux solaire radio F10.7.



Fig. 1 Variations observées de l'irradiance solaire totale depuis 1978. Le trait bleu clair correspond aux valeurs journalières, et le trait bleu foncé une moyenne courante de largeur 81 jours. Ces données sont tirées du composite d41\_61\_0702 distribué par le Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos. Les traits orange et rouge sont leurs équivalents tels que produit par les simulations décrites plus bas, artificiellement décalés vers le bas de 4 W/m<sup>2</sup> afin de faciliter la comparaison.





cycle d'activité, de la fraction du disque solaire occuppée par des structures magnétiques avant des émissivités radiatives différentes des régions non-magnétisées de la photosphère<sup>[2-4]</sup>. On sait, par exemple, que les structures magnétiques de plus grandes tailles, comme les taches solaires, nuisent au transport convectif de l'énergie, et se retrouvent donc plus froides que la photosphère, ce qui cause un déficit d'irradiance. Par contre, les soi-disantes facules et éléments du réseau supergranulaire, structures magnétisées de bien plus petites tailles mais beaucoup plus nombreuses, produisent un déficit local de densité au niveau de la photosphère, permettant ainsi de "voir" les régions plus profondes - et donc plus chaudes - du soleil. Collectivement, l'ensemble de ces petites structures magnétiques conduit donc à un excès d'irradiance qui dépasse légèrement le déficit associé aux taches, ce qui se traduit en un soleil légèrement plus brillant au maximum d'activité (cf. Figures 1 et 3). Il est maintenant bien démontré que les variations de l'irradiance sur les courtes échelles temporelles (de la minute à l'année) sont bel et bien associées à ces effets de surfaces [5]. Une seconde classe d'explication attribue une partie, voire la totalité, des variations sur les échelles décadales et plus à une modulation de l'efficacité du transport convectif de l'énergie depuis la base de la zone convective solaire, 200000 km sous la surface, causée par une interaction dynamique entre le fort champ magnétique agissant comme moteur du cycle d'activité, et les écoulements fluides associés à la



Paul Charbonneau <paul.charbonneau@ umontreal.ca> et Ashley Crouch, Département de physique, Université de Montréal, C.P. 6128 Succ. Centre-Ville, Montréal, QC, H3C 3J7, CANADA; et

Ken Tapping, Institut Herzberg d'Astrophysique, Conseil national de la recherche, P.O. Box 248, Penticton, C-B V2A 6J9, CANADA convection<sup>[6,7]</sup>. Il va sans dire que ces deux classes d'explications ne sont pas mutuellement exclusives.

Il n'en demeure pas moins que depuis 1978, les variade l'irradiance tions observées entre les phases maximales et minimales du cycle d'activité sont très faibles, de l'ordre de 0.1%. Une si faible variation, sur une échelle décadale de surcroit, n'a essentiellement pas d'effet sur le climat terrestre, en raison principalement de l'inertie thermique que confèrent les océans au climat. On doit cependant remarquer que les derniers trois cycles d'activité, les seuls pour lesquels nous disposons de mesures directes et fiables de l'irradiance, ne sont pas particulièrement représentatifs des variations de l'activité solaire observées depuis le début du dix-septième siècle, du moins au



Fig. 2 Image du soleil en lumière continue, où l'on peut noter la présence de nombreuses taches solaires, plus sombres que la photosphère, et de facules, structures filamentaires plus brillantes que la photosphère et surtout visible près du limbe, où leur contraste est plus grand. Les éléments brillants du réseau supergranulaire sont trop petits pour être visibles à cette résolution spatiale. Image obtenue le 30 mars 2001 par l'imageur optique sur SOHO/MDI (NASA), en phase élevée du cycle d'activité magnétique.

niveau des taches solaires (voir Figure 3). Comment se comporte l'irradiance durant des phases d'augmentation graduelle du niveau général d'activité, comme durant la première moitié du vingtième siècle, ou durant des périodes prolongées d'activité fortement réduite, comme le fameux Minimum de Maunder entre 1645 et 1715?

La coincidence temporelle entre le Minimum de Maunder et la phase la plus marquée du "petit âge glaciaire" bien connu en climatologie (voir Ref. [9], et références s'y trouvant) a motivé une vaste gamme de tentatives d'estimation du niveau auquel aurait pu chuter l'irradiance solaire durant une telle phase prolongée d'inactivité, et, plus généralement, de l'impact de l'activité solaire sur le climat terrestre. Ces questions sont d'autant plus importantes que les études du niveau général de l'activité solaire via la mesure des abondances de radioisotopes cosmogéniques<sup>[10]</sup> ont démontré hors de tout doute que le Minimum de Maunder n'est



ni, d'amplitude variable et d'une période allant de 9 à 14 ans, avec une valeur moyenne de 11 ans. Le cycle magnétique sous-jacent a une période du double du cycle des taches, ces dernières se formant quelle que soit la polarité du champ magnétique solaire interne. Le peu de taches solaires observées durant le Minimum de Maunder (1645-1715), ne reflète pas un manque de données mais représente un épisode d'activité fortement réduite. Les traits verticaux verts délimitent la période 1978-2007, pour laquelle des mesures de l'irradiance sont disponibles (Figure 1).

pas un événement unique, mais que de tels épisodes se sont produits de manière irrégulière une trentaine de fois dans les derniers 10000 ans<sup>[11]</sup>, et donc pourrait fort bien se produire de nouveau.

La majorité des reconstructions de l'irradiance remontant jusqu'au dix-septième siècle publiées à date sont basées sur des corrélations statistiques établies à l'aide d'observations magnétographiques récentes, permettant d'établir un lien entre la couverture surfacique de diverses classes de structures photosphériques magnétisées, et des indicateurs indirects ayant une longue archive temporelle comme les taches solaires, le niveau d'émission dans certaines raies spectrales sensibles à la présence d'un champ magnétique, le flux radio F10.7, etc.<sup>[12-15]</sup>. Une approche alternative consiste à établir un lien évolutif entre les taches, facules, réseau, etc., via un modèle physique simple. La reconstruction de l'irradiance en résultant doit aussi être calibrée sur 1978-2007, mais l'universalité des lois de la physique suggère qu'un tel modèle peut être extrapolé avec plus de confiance qu'une combinaison de corrélations de nature purement statistique. L'incertitude provient maintenant principalement du niveau de réalisme du modèle physique utilisé.

Dans ce qui suit, nous décrivons un modèle physique de ce genre, récemment développé par le groupe de recherche en physique solaire à l'Université de Montréal <sup>[16,17]</sup> (voir également Refs. [18] et [19] pour des reconstructions basées en partie sur la même "philosophie"). Nous discutons ensuite l'étalonnage de ses paramètres internes à partir des données de l'irradiance pour 1978-2007, et présentons finalement une reconstruction de l'irradiance remontant à 1874 produites par le modèle ainsi calibré, incluant une variation à long terme du niveau général d'activité.

### MODÉLISATION PHYSIQUE DE L'IRRADIANCE

Notre procédure de modélisation de l'irradiance est décrite avec abondance de détails dans Ref. [16], ce qui suit n'étant qu'un bref résumé. Le simulation couvre la surface du soleil, et évolue dans le temps selon un pas journalier. Jour après jour, les taches solaires sont "injectées" dans la simulation aux latitudes, longitudes et avec la taille correspondant aux observations d'émergence de taches et régions actives compilées à partir des données photographiques du Royal Greenwich Observatory pour 1874-1976, et de l'USAF pour 1977-2007 http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml). (voir Comme nous ne pouvons observer que la moitié de la surface du soleil, on s'attend à ce que cette banque de données ne contienne que la moitié des émergences s'étant produites à la surface du soleil; nous introduisons donc une procédure statistique stochastique afin de modéliser les émergences sur la face cachée.

Les taches ainsi injectées se désagrègent par la suite en plus petites structures, sous l'effet de la fragmentation et de l'érosion en leur périphérie (processus pour lesquels il existe un bon support observationnel; voir, e.g., Refs. [20-22], et références

s'y trouvant). Ces fragments deviennent par la suite sujets au même processus de fragmentation/érosion, jusqu'à une certaine taille minimale en deça de laquelle les fragments disparaissent (e.g. par submergence convective) avec une probabilité dont la valeur, difficile à contraindre observationnellement, est traitée comme un paramètre du modèle.

La procédure décrite ci-dessus produit une distribution de "fragments" de tailles diverses, évoluant dans le temps. Ces fragments sont ensuite regroupés en deux grandes classes selon leurs tailles, soit les "taches", observées comme étant plus sombres que la photosphère, et les "facules", plus brillantes. Dénotant par  $S_Q$  l'irradiance de la photosphère non-magnétisée (incluant l'effet du noircissement centre-bord), on modélise l'irradiance selon l'expression

$$S(t) = S_{Q} + \sum_{i=1}^{N_{s}(t)} \Delta S_{s,i} + \sum_{j=1}^{N_{f}(t)} \Delta S_{f,j} , \qquad (1)$$

où  $N_s(t)$  et  $N_f(t)$  correspondent au nombre de taches et facules présentes en surface au jour t,  $\Delta S_{s,i}$  correspond au déficit d'irradiance associé à la tache i, et  $\Delta S_{f,j}$  à l'excès correspondant à la facule j, Ces deux dernières quantités dépendent à la fois de la taille et de la position de la structure à la surface du soleil; nous utilisons les expressions suivantes, établies empiriquement (voir, e.g., [Refs. 4, 23, et 24]):

$$\frac{\Delta S_{s,i}}{S_{Q}} = -\frac{1}{2}\mu A_{s,i} \left(3\mu + 2\right)$$
(2)

$$\frac{\Delta S_{f,j}}{S_Q} = -\frac{1}{2} \mu A_{f,j} (3\mu + 2) \left(\frac{1}{\mu} - 1\right) \alpha_f,$$
(3)

où les couvertures surfaciques  $A_{s,i}$  et  $A_{f,j}$  sont exprimées en fraction de l'hémisphère  $(2\pi R_{\odot}^2)$ ,  $\mu = \cos \theta \cos \phi$  mesure l'angle centre-bord, et le contraste faculaire  $\alpha_f$  est considéré comme paramètre du modèle, ses déterminations observationnelles n'étant pas très précises. Notons que la couverture surfacique totale des taches est donnée par

$$A_{s}(t) = \sum_{i=1}^{N_{s}(t)} A_{s,i} .$$
(4)

Il est crucial de noter que ce modèle, si simple soit-il, est de nature partiellement stochastique: la même séquence de données en entrée (émergences de taches) produira des courbes d'irradiance distinctes sous diverses réalisations aléatoires du processus de fragmentation et/ou des émergences sur la face cachée du soleil. Il s'avère que ce second aspect domine la stochasticité du modèle (pour plus de détails voir Ref. [16]).

## ÉTALONNAGE DU MODÈLE: 1978-2007

En bout de ligne, le modèle de base décrit ci-dessus se retrouve défini par 10 paramètres, dont seulement quatre peuvent être contraints de manière fiable sur la base des observations. Les six autres paramètres doivent donc être ajustés de manière à offrir la meilleure représentation possible de l'irradiance observée dans l'intervalle 1978-2007. À prime abord il s'agit ici d'un problème d'optimisation classique, mais la stochasticité inhérente au modèle complique sérieusement la situation, tout comme le fait que l'espace des paramètres est fortement multimodal, i.e., plusieurs combinaisons distinctes de paramètres peuvent produire des séquences temporelles d'irradiance comparables.

Face à ces difficultés, nous avons choisi d'optimiser le modèle à l'aide d'un algorithme génétique (ci-après AG), plus spécifiquement la version 1.2 du logiciel PIKAIA <sup>[25,26]</sup>. Nous cherchons à minimiser simultanément les écarts quadratiques moyens entre les séquences temporelles S(t) et  $A_s(t)$  observées, et celles produites par le modèle décrit ci-dessus. Voir la §3 de Ref. [16] pour tous les détails concernant cette procédure de minimisation.

Une solution typique S(t) est présentée sur la Figure 1, sous une forme équivalente aux observations (trait orange: valeurs journalières; trait rouge: moyenne courante sur 81 jours). En raison des aspects stochastiques du modèle, on ne peut s'attendre à ce que les observations soient reproduites dans tous leurs détails; cependant il est clair que la simulation reproduit bien l'allure générale des variations observées, autant au niveau des amplitudes que des échelles de temps. Considérant la simplicité (relative) du modèle dans sa forme actuelle, le résultat est remarquable!

La flexibilité de l'AG nous permet de généraliser facilement le modèle de manière à inclure des sources additionelles d'irradiance, n'étant pas directement associées à la désagrégation des taches. Par exemple, certaines observations suggèrent qu'il existe une source de structures de type faculaire qui contribuent un excès d'irradiance en début de cycle. Les observations historiques de l'activité solaire (Fig. 3) indiquent aussi la présence de variations à long terme du niveau général de l'activité, qui pourraient s'accompagner de variations du niveau de base de l'irradiance.

Considérons tout d'abord l'existence possible d'une variation cyclique de l'irradiance du disque ( $S_Q$  dans l'éq. (1)), i.e., le modèle d'irradiance est maintenant défini par:

$$S(t) = S_{Q} + S_{0} \sin(\omega t + \phi) + \sum_{i=1}^{N_{s}(t)} \Delta S_{s,i} + \sum_{j=1}^{N_{f}(t)} \Delta S_{f,j} .$$

$$(5)$$

La fréquence angulaire  $\omega$ , la phase  $\phi$  et l'amplitude  $S_0$  de cette variation sont toutes traitées comme des paramètres libres, ajustés via l'AG simultanément aux autres paramètres du modèle de base décrit à la §2 (voir Ref. [17] pour plus de détails sur ces modèles "améliorés").

La Figure 4 présente les résultats produits par un tel modèle une fois calibré à l'intervalle 1978-2007, dans un format permettant de quantifier l'impact des aspects stochastiques du modèle. La partie (a) présente la courbe d'irradiance journalière observée (trait bleu), lissée via une moyenne courante de 81 jours. La bande rouge représente les résultats de 1000 minimisations par AG, débutant de populations initiales distinctes et utilisant des réalisations aléatoires distinctes des émergences sur la face cachée et de la fragmentation des taches. Travaillant encore une fois à partir des séquences temporelles lissées sur 81 jours, pour chaque pas de temps (journalier) on calcule la moyenne (*S*) des 1000 simulations ainsi que la déviation standard ( $\sigma$ ) par rapport à cette moyenne; on trace ensuite un trait vertical (rouge) couvrant l'intervalle  $S \pm \sigma$ . La répétition de cette procédure à chaque pas de temps journalier produit la bande rouge. La même procédure, appliquée cette fois à la couverture surfacique totale des taches,  $A_s(t)$ , est illustrée en (b).

La courbe verte en (a) montre la variation sinusoidale correspondant à une des meilleures solutions produites par l'AG. Ces simulations présentent des résidus quadratiques moyens de l'irradiance significativement plus petits (0.168 W m<sup>-2</sup> plutôt que 0.202 W m<sup>-2</sup>) que pour un niveau basal  $S_Q$  constant, comme dans l'éq. (1). Ceci suggère qu'il existe une source de structures "brillantes" qui n'est pas reliée à la désagrégation des taches solaires, mais qui varie néanmoins approximativement en phase avec le cycle d'activité. Les observations solaires offrent déjà plusieurs pistes quant à la nature de cette source; on observe ainsi souvent des facules émergeant simul-





tanément (ou parfois même un peu avant) les taches produisant une nouvelle région d'activité. Une explication alternative assignerait la variation sinusoidale à une variation structurelle de la zone convective solaire. Il n'est présentement pas possible de démarquer ces différents scenarii uniquement sur la base de nos résultats de modélisation. Cependant, les mesures simultanées de l'irradiance, du diamètre solaire et de la forme du limbe solaire qui seront produites par la mission spatiale PICARD (http://earth-sciences.cnes.fr/PICARD/Fr/), dont le lancement est prévu pour juin 2009, pourraient fort bien changer la donne.

## **RECONSTRUCTION DE L'IRRADIANCE DEPUIS 1874**

Une fois les paramètres libres du modèle fixés par étalonnage sur l'intervalle 1978-2007, il devient possible d'utiliser le modèle pour produire des reconstructions de l'irradiance débutant là où commence notre banque de données des émergences de taches solaires, soit 1874. L'intervalle de temps ainsi simulé couvre la majorité de l'ère industrielle, et en particulier la période de réchauffement terrestre global ayant débuté au vingtième siècle. Le niveau général de l'activité a considérablement varié depuis 1874 (cf. Fig. 3), et ceci pourrait fort bien produire une variation à long terme de  $S_O$  se superposant aux variations associées à la couverture surfacique des taches, facules, etc. La Figure 5 présente une reconstruction remontant à 1874, incorporant une modulation à long terme de la contribution à l'irradiance provenant de la partie non-magnétisée de la photosphère, calculée selon la procédure semi-empirique décrite dans Tapping et al. [19]. Plus spécifiquement, l'éq. (1) est maintenant remplacé par

$$S(t) = S_{Q,c} + S_{Q,a}S_{10.7}(t) + \sum_{i=1}^{N_s(t)} \Delta S_{s,i} + \sum_{j=1}^{N_f(t)} \Delta S_{f,j}.$$
(6)

où  $S_{10.7}$  est la variation lente du flux radio F10.7 en fonction du temps, telle que reconstruite par Tapping *et al.*<sup>[19]</sup>. Le flux radio F10.7 est généralement considéré comme étant un bon indicateur du niveau général de l'activité magnétique globale<sup>[27]</sup>, et parmi tous les indicateurs de l'activité solaire est celui qui corrèlle le mieux avec l'irradiance. Le nouveau paramètre  $S_{Q,a}$  et le niveau basal constant  $S_{Q,c}$  sont tous deux ajustés via l'AG simultanément aux autres paramètres du modèle d'irradiance. Encore une fois, les meilleures solutions évoluées par l'AG utilisant l'éq. (6) présentent de plus faibles résidus quadratiques moyen (0.188 W m<sup>-2</sup>) que ceux caractérisant le modèle de base décrit par l'éq. (1).

Une reconstruction semblable mais utilisant le modèle de base décrit à la section sur la modélisation physique de l'irradiance (éq. (1) est présentée dans Ref. [16]; voir Figure 13). Le niveau de l'irradiance aux minima d'activité d'une telle reconstruction demeure fixé, par construction, à la valeur produite par la procédure d'étalonnage du modèle sur 1978-2007, soit 1365.42 W/m<sup>2</sup>. La reconstruction de la Figure 5 ci-dessus, cependant, accuse une hausse de l'irradiance aux minima d'activité d'en-

viron 0.4 W m<sup>-2</sup> entre 1900 et 1986; cette hausse est petite, mais sur de telles échelles de temps aurait déjà une influence détectable sur le climat.

Il est clair que le détail du modèle d'irradiance et de la procédure d'étalonnage sur 1978-2007 peuvent avoir un impact important sur les reconstructions de l'irradiance. Notons, par exemple, que Tapping *et al.* <sup>[19]</sup>, à partir du même profil de qu'adopté ici mais utilisant une procédure de modélisation différente, arrive à un écart 1874-2008 de 0.8 W/m<sup>2</sup>, soit le double de celui caractérisant la reconstruction de la Figure 5. De plus, d'autres reconstructions récentes (e.g. Ref. [28]) suggèrent une augmentation de l'irradiance depuis 1874 dépassant 2 W m<sup>-2</sup>. Il est donc impératif de développer des modèles des variations 1978-2007 qui soient les plus réalistes possibles au niveau de la physique sous-jacente, mais tout en demeurant assez simples pour pouvoir servir de base à des simulations couvrant plusieurs siècles, et pouvant être effectuées en un temps de calcul raisonnable.

#### DU PAIN SUR LA PLANCHE...

Nous travaillons présentement à plusieurs améliorations de la procédure de modélisation de l'irradiance solaire décrite cidessus, notamment au niveau de l'inclusion d'un modèle de type agrégation/diffusion pour la formation des facules et des éléments du réseau magnétique supergranulaire <sup>[29]</sup>. Nous avons déjà entâmé la généralisation de la procédure à la modélisation de l'irradiance spectrale, soit la synthèse du spectre solaire en entier, et plus particulièrement la portion du spectre ultraviolet contrôlant la chimie et la dynamique de la



utilisée, soit un soleil sans taches.

stratosphère terrestre. Nous continuons d'explorer l'utilisation des archives du flux radio F10.7, remontant à 1947, comme tremplin permettant une modélisation physique plus réaliste des variations à long terme de la contribution à l'irradiance provenant des régions non-magnétisées de la photosphère solaire, ce qui nous permettrait de pousser les reconstructions au moins jusqu'au Minimum de Maunder. À ce niveau il est également intéressant de noter qu'au moment d'écrire ces lignes (juin 2008), en phase minimale d'activité séparant le cycle 23 du cycle 24, le flux radio F10.7 ainsi que l'irradiance ont atteint des valeurs plus basses que jamais observées auparavant, et le début du cycle 24 accuse près d'un an de retard par rapport aux prévisions faites durant la phase descendante du cycle 23. Le soleil nous réserve-t-il une surprise? A suivre!

## REMERCIEMENTS

Les travaux décrits ici bénéficient du support financier du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie (Programmes "Subventions à la Découverte" et "Chaires de Recherche du Canada"), de la Fondation Canadienne pour l'Innovation, et des Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (Programme "Projet de Recherche en Équipe").

#### **BIBLIOGRAPHIE**

- 1. Fröhlich, C., & Lean, J., Astron. Astrophys. Rev., , 273-320, (2004).
- 2. Foukal, P., & Lean, J., Astrophys. J., 302, 826-835, (1986).
- 3. Chapman, G.A., Cookson, A.M., & Dobias, J.J., J. Geophys. Res., 101, 13541-13548, (1996).
- 4. Lean, J.L., Cook, J., Marquette, W., & Johannesson, A., Astrophys. J., 492, 390-401, (1998).
- 5. Foukal, P., & Bernasconi, P.N., Sol. Phys., 248, 1-15, (2008).
- 6. Kuhn, J.R., & Stein, R.F., Astrophys. J., 463, L117-L120, (1996).
- 7. Li, L.H., Basu, S., Sofia, S., Robinson, F.J., Demarque, P., & Guenther, D., Astrophys. J., 591, 1267-1284, (2003).
- 8. Hoyt, D.V., & Schatten, K., Sol. Phys., 181, 491-512, (1998).
- 9. Eddy, J.A., Science, 192, 1189-1202, (1976).
- 10. Beer, J., Space Sci. Rev., 94, 53-66, (2000).
- 11 Usoskin, I.G., Solanki, S., & Kovaltsov, G.A., Astron. Astrophys., 471, 301-309, (2007).
- 12. Foukal, P., & Lean, J., Science, 247, 505-604, (1990).
- 13. Hoyt, D.V., & Schatten, K., J. Geophys. Res., 98, 18895-18906, (1993).
- 14. Lean, J.L., Beer, J., & Bradley, R., Geophys. Res. Lett., 22, 3195-3198, (1995).
- 15. Krivova, N.A., Balmaceda, L., & Solanki, S.K., Astron. Astrophys., 467, 335-346, (2007).
- 16. Crouch, A.D., Charbonneau, P., Beaubien, G., & Paquin-Ricard, D., Astrophys. J., 677, 723-741, (2008).
- 17. Crouch, A.D., & Charbonneau, P., Astrophys. J., soumis, (2008).
- 18. Wang, Y.-M., Lean, J.L., & Sheeley, N.R.Jr., Astrophys. J., 625, 522-538, (2005).
- 19. Tapping, K.F., Boteler, D., Charbonneau, P., Crouch, A.D., Manson, A., & Paquette, H., Sol. Phys., 246, 309-326, (2007).
- 20. Schrijver, C.J., Astrophys. J., 547, 475-490, (2001).
- 21. Petrovay, K., & Moreno-Insertis, F., Astrophys. J., 485, 398-408, (1997).
- 22. Martinez Pillet, V., Astron. Nach., 323, 342-348, (2002).
- 23. Chapman, G.A., & Meyer, A.S., Sol. Phys., 103, 21-31, (1986).
- 24. Brandt, P.N., Stix, M., & Weinhardt, H., Sol. Phys., 152, 119-124, (1994).
- 25. Charbonneau, P., Astrophys. J. Suppl., 101, 309-334, (1995).
- 26. Charbonneau, P., Release Notes for PIKAIA 1.2, NCAR Technical Note TN-451-STR, Boulder: National Center for Atmospheric Research, (2002).
- 27. Tapping, K.F., J. Geophys. Res., 92, 829-838, (1987).
- 28. Solanki, S.K., & Fligge, M., Geophys. Res. Lett., 25, 341-344, (1998).
- 29. Crouch, A.D., Charbonneau, P., & Thibault, K., Astrophys. J., 662, 715-729, (2007).