

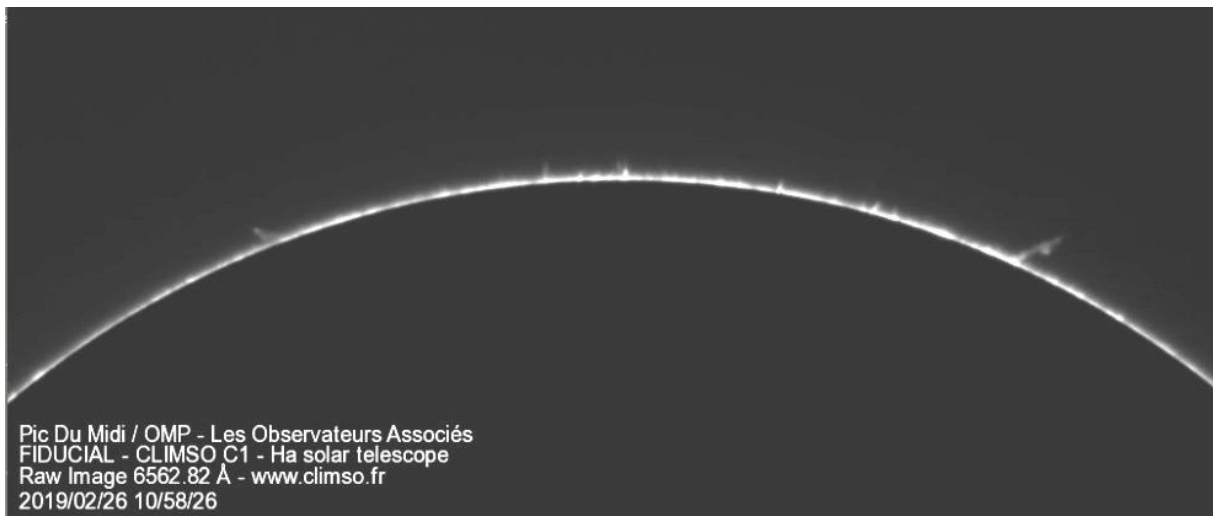
Le rôle des petits événements rapides de haute latitude dans les cycles de l'activité solaire

Claude Frelat, Jacques-Clair Noëns, Odile Wurmser et Géraldine Martial Pédezert

Observateurs Associés/Fiducial, Observatoire Midi-Pyrénées

Janvier 2021

La formidable base de données d'observation obtenue depuis 1994 par les Observateurs Associés (voir encadré 1) de l'Observatoire Midi-Pyrénées met en évidence des propriétés bien particulières des événements éruptifs se produisant aux hautes latitudes du Soleil et particulièrement dans les régions polaires. L'étude menée tout au long du cycle solaire 24, utilisant les données d'observation obtenues avec l'instrument imageur CLIMSO installé au Pic du Midi, montre les relations entre la fréquence de ces phénomènes et le cycle des taches, à savoir qu'elle varie essentiellement à contre sens ! Ceci complète notre vision des cycles de l'activité solaire.



Exemple de l'activité visible dans les régions de haute latitude Nord. Ces événements ont une durée de vie de quelques minutes et une hauteur de quelques milliers de kilomètres.

Introduction

La surveillance de l'activité solaire montre un déclin de celle-ci sur les trois derniers cycles. Comme nous le montrent clairement les résultats publiés par le GFOES (1), cette baisse d'activité est manifeste non seulement au moment du maximum du cycle, mais aussi dans toutes ses phases, y compris au minimum. Attentifs à cette évolution, nous cherchons si d'autres manifestations de l'activité magnétique peuvent être détectées dans cette période apparemment calme.

Dans le cadre du Service d'Observation Solaire de l'Observatoire Midi-Pyrénées, les images obtenues tout au long du cycle 23 par les *Observateurs Associés* avec le coronographe imageur H-alpha HACO de l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) au Pic-du-Midi, avaient montré la présence de nombreux petits phénomènes rapides dans la chromosphère dans les régions de haute latitude et particulièrement les régions polaires. Nous avons été surpris par l'abondance de ces événements et avons remarqué une asymétrie bien marquée de leur fréquence entre les régions polaires Nord et Sud, s'inversant brusquement au moment de la reprise de l'activité à la fin du palier du minimum du cycle 23 (2). Les données obtenues tout au long du cycle 24 par l'instrument CLIMSO (Christian Latouche Imageur Solaire), installé au Pic-du-Midi depuis 2007 par les *Observateurs Associés* et le service d'observation solaire de l'OMP, nous apportent des informations plus précises sur la caractérisation et la distribution dans le temps de ces événements. Grâce à une meilleure résolution angulaire, ces événements, essentiellement radiaux ou peu inclinés et de faible hauteur (quelques milliers de kilomètres), apparaissent le plus souvent comme des mini-éruptions ou de petites éjections de matière, rapides et ponctuelles, un peu comme s'ils représentaient une forme élémentaire de phénomènes éruptifs plus complexes. Nous ne discuterons pas ici de la nature de ces événements que nos observations ne permettent pas de préciser avec certitude. Le rideau spiculaire qui pourrait en être à l'origine n'atteint pas une altitude suffisante pour être accessible directement à un coronographe comme le nôtre, dédié à l'observation du limbe entier et de l'ensemble des phénomènes dynamiques s'y déroulant à de plus hautes altitudes. Cependant, ces phénomènes observés pourraient être issus de l'évolution exceptionnelle de spicules, voire de macro-spicules. Ce sont peut-être aussi des petites éjections de matière coronale (mini-CME) ou des mini-éruptions plus violentes se produisant dans des facules polaires comme nous le verrons plus loin. Le déroulement de ces différents phénomènes fait appel à des processus physiques très différents. Mais une conséquence commune en est le transport de matière et d'énergie des hautes couches du soleil, photosphère et chromosphère, vers la couronne solaire et vers l'espace par le vent solaire.

Observations et méthode d'analyse

Observations

Les observations systématiques avec CLIMSO ont débuté en juillet 2007 et se poursuivent aujourd'hui. CLIMSO est un instrument multi-longueurs d'onde, regroupant deux coronographes de 200mm et deux lunettes de 90 et 150 mm utilisés conjointement. Cet instrument produit des images simultanées du limbe et du disque solaire dans plusieurs longueurs d'onde, c'est-à-dire permettant d'observer simultanément plusieurs composantes de la chromosphère sur le disque et au-dessus du limbe dans la couronne. La base de données CLIMSO comprend d'une part les images calibrées de la chromosphère obtenues simultanément par les coronographes en H-alpha à 656,3 nm. et dans la raie de l'hélium I (HeI) à 1083,0 nm. et d'autre part des images du disque solaire obtenues simultanément par les lunettes en H-alpha (656,3 nm.) et dans la raie K du Calcium ionisé (CaII-K, 393,4 nm.). Elle est complétée par un ensemble de séquences vidéo, montées à partir des images acquises après recentrement. Ceci simplifie l'accès aux événements dynamiques observés et l'affichage des scénarios d'évolutions de ces phénomènes au cours de chaque journée d'observation. Les résultats présentés dans cet article couvrent la période de juillet 2007 à juillet 2019 recouvrant ainsi le cycle 24 depuis sa remontée en activité vers un maximum peu marqué et précédant une longue descente de l'activité vers un minimum peu marqué lui aussi.

Méthode d'analyse

Pour cette analyse, nous avons utilisé les séquences vidéo à pleine résolution centrées sur les régions polaires Nord et Sud (champ total de 40° , soit 20° de chaque côté du nord et du sud célestes) ainsi que sur les régions de haute latitude s'étendant de 20° au-delà des régions polaires. L'étendue des champs d'analyse étudiés n'exige pas que l'on apporte une correction du fait de l'angle B_0 de l'axe de rotation solaire par rapport au plan de l'écliptique, variable de $\pm 7,23^\circ$ au cours de l'année. Nous avons vérifié qu'aucune modulation annuelle n'apparaissait de ce fait dans les résultats. Par contre, l'angle p que fait l'axe de rotation du Soleil par rapport au nord céleste qui varie de $\pm 26,32^\circ$ au cours de l'année doit être pris en compte. L'ensemble des données, images et séquences vidéo, obtenues par CLIMSO sont corrigées de cet angle dès leur acquisition, avant même leur mise à disposition dans les bases de données.

Dans chacune de ces quatre régions, nous avons dénombré les phénomènes actifs se produisant pendant la durée de l'observation comme l'illustre l'image ci-dessus. Nous n'avons pas cherché à les classer suivant leur développement en altitude ou leur intensité. Les séquences-vidéo à pleine résolution les montrent clairement sans qu'il soit possible de les confondre avec des phénomènes évolutifs plus lents, comme par exemple des évolutions dans les structures basses des protubérances, peu nombreuses cependant à ces latitudes.

Comme la durée de chaque journée d'observation dépend essentiellement des conditions météo et de la qualité du ciel, il est nécessaire de procéder à une étape d'homogénéisation en rapportant à une même base de temps les résultats obtenus. Pour chaque journée, et chacune des quatre régions analysées, nous avons obtenu par extrapolation une estimation de la fréquence d'apparition de ces petits phénomènes actifs sur une durée de 24 heures et c'est ce résultat qui est discuté ici. Dans la suite de ce texte nous nommerons par « activité » la fréquence d'apparition en 24 heures de ces petits phénomènes dynamiques. Nous avons vérifié qu'à l'échelle de quelques heures la distribution dans le temps de ces phénomènes, bien que non parfaitement régulière, est suffisamment homogène pour que l'extrapolation sur 24 heures à partir d'une durée d'observation continue supérieure à 2 heures ait un sens. Nous avons donc sélectionné les journées d'observation de plus de deux heures continues.

La fréquence de la saisie des images dépend, elle aussi, des conditions de chaque observation. Non seulement de la qualité du ciel, diffusion et agitation des images, mais aussi de celle du suivi. Elle est donc variable d'une journée à une autre et il est nécessaire d'en tenir compte. Pour cette étape, nous avons déterminé sur l'ensemble des observations, un coefficient de correction permettant une homogénéisation réaliste des données. Après l'application de cette correction, nous avons vérifié l'indépendance des résultats obtenus par rapport aux fréquences d'acquisition des images utilisées dans une gamme de fréquences allant de 0,3 à 3 images/minute. Les événements observés sont rapides pour certains, plus longs pour d'autres, de quelques minutes à une vingtaine de minutes. On comprend que les événements dont la durée de vie est courte par rapport à la cadence de saisie des images ne seront pas statistiquement détectés, il est donc nécessaire d'adopter des cadences d'acquisition d'images suffisamment rapides, de l'ordre d'une image/minute à l'idéal, que l'observateur peut accélérer dans les moments où des événements sont détectés. Sur cette période, de juillet 2007 à juillet 2019, nous avons analysé 1 100 journées dont la durée d'observation effective est comprise entre 2 et 11 heures.

Résultats d'ensemble sur le cycle

Les observations confirment le nombre important des petits phénomènes actifs visibles dans les régions de haute latitude. Sur cette période de 12 ans ont été détectés en moyenne 326 événements par 24 heures dans les régions polaires et 224 dans celles de haute latitude les prolongeant. Sur l'ensemble de la période, la région polaire Sud est restée un peu plus « active » que la région Nord (avec respectivement 180 et 146 événements par 24 heures) ; il en est de même pour les régions de haute latitude (avec respectivement 115 et 99 événements par 24 heures). Le coronographe ne peut montrer que les événements se produisant au limbe à partir d'une altitude dépendant de l'agitation des images et des caractéristiques instrumentales. Par conséquent, les chiffres auxquels nos estimations conduisent sont minimisés. Une estimation grossière multiplierait ces chiffres par un facteur de l'ordre de 100 pour tout l'ensemble du disque. Autrement dit, même si chacun de ces événements peut paraître modeste comparé aux grandes manifestations de l'activité solaire, l'ensemble de ceux-ci forme une composante bien réelle de l'activité, susceptible d'apporter une contribution forte aux échanges chromosphère-couronne-vent solaire.

Relations avec le cycle des taches

La figure 1 montre, en bleu, la variation de l'activité dans les régions polaires Nord+Sud tout au long du cycle 24. Ce sont des valeurs mensuelles. On peut voir qu'elles varient d'un facteur 10 environ (d'une centaine à plus d'un millier) au cours du cycle. Nous avons reporté également, en orange, une estimation de l'activité hémisphérique (cycle des taches) obtenue en utilisant les images du disque dans la raie CaII-K observée par la lunette de 90 mm (échelle de valeurs de 1 à 4 pour chaque hémisphère). Cette figure est riche d'enseignements. Peu après le moment où l'activité hémisphérique atteint son deuxième maximum, la fréquence des événements polaires est à son minimum, puis elle croit fortement pendant la phase de descente de l'activité principale pour atteindre un maximum bien marqué en 2018 un ou deux ans avant le minimum du cycle. L'activité polaire commence alors une phase de décroissance. Une première conclusion s'impose : la fréquence des phénomènes éruptifs polaires varie essentiellement à contre sens de l'activité du cycle des taches avec un décalage de une à deux années. La deuxième conclusion qui s'impose est que la modulation de cette courbe n'est pas ajustée sur un cycle de la même durée que celle du cycle des taches 11 ou 12 ans, les valeurs atteintes à la fin de la période étant très supérieures aux valeurs initiales. Si elle est cyclique, la durée du cycle de l'activité des hautes latitudes semble plus longue. Nous devons continuer les observations et notre analyse encore plusieurs années pour confirmer ce point.

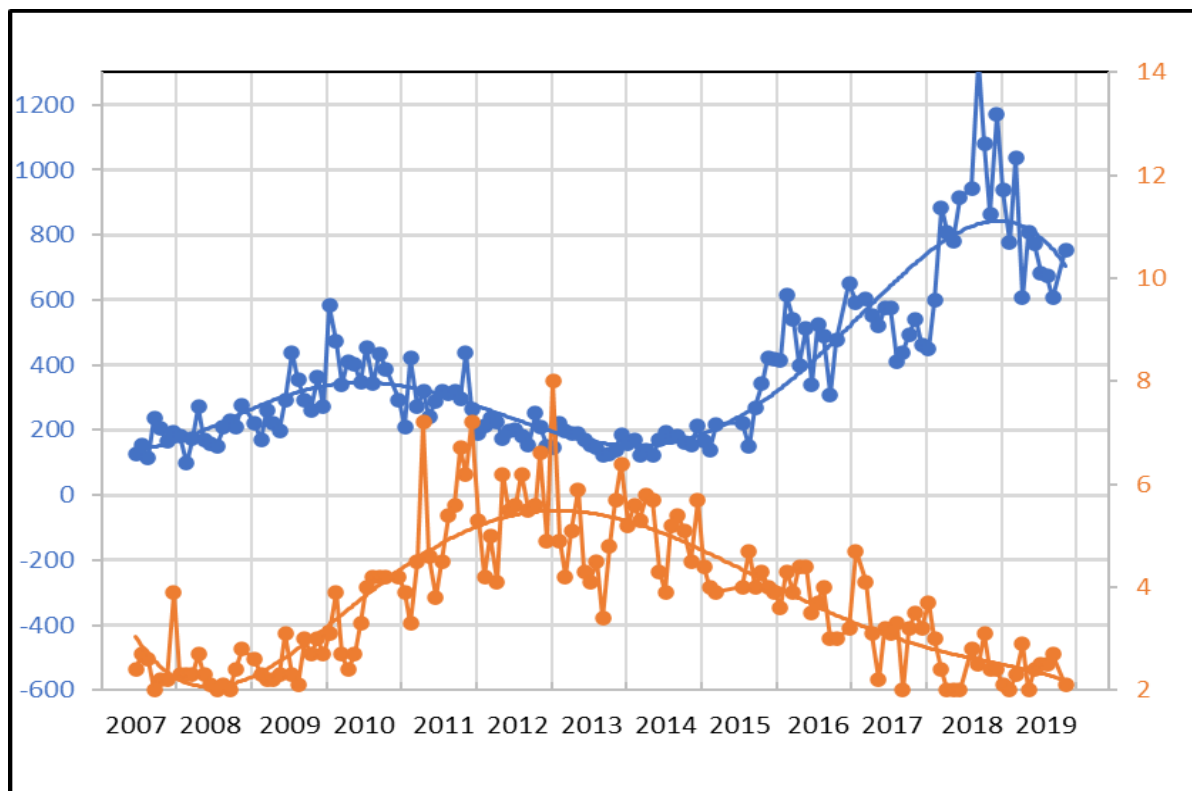


Figure 1

En bleu, courbe de la fréquence des événements polaires (Nord + Sud) exprimée en nombre d'événements par 24 heures et en orange, l'activité hémisphérique (nord + sud) ou cycle des taches, exprimée dans une échelle de 1 à 4 pour chaque hémisphère. Les valeurs indiquées sont mensuelles.

L'activité des régions polaires est observée aussi dans les régions de haute latitude s'étendant de 20° au-delà des régions polaires. Plus faible que celle des régions polaires, elle varie elle aussi à l'inverse de l'activité du cycle des taches avec un décalage de quelques mois et présente une courbe d'évolution dans le temps semblable à celle de la figure 1 (figure 2). La figure 3 montre l'évolution du rapport entre l'activité des régions polaires (Nord+Sud) et celle des régions de haute latitude (Nord+Sud). Environ deux fois moins élevée que dans les régions polaires au moment du minimum, leur fréquence se rapproche ensuite de celle des régions polaires pour atteindre brièvement un équilibre deux ans environ après le maximum du cycle des taches, au moment où le trou coronal polaire est recentré au-dessus des pôles. Leur fréquence se remet ensuite à croître pendant la période de réduction de l'activité du cycle des taches, lorsque le trou coronal s'étend vers les régions équatoriales. Ceci est à comparer avec la couronne solaire pour laquelle c'est au maximum que l'activité tend à s'équilibrer entre les régions équatoriales et celle de haute latitude comme le montrent les images d'éclipse. Cependant, on peut noter que le rapport entre les activités polaires et celles de haute latitude n'est pas revenu au bout de 12 ans à sa valeur de départ, montrant ainsi que l'on n'est pas dans un cycle identique à celui des taches, comme nous l'avons déjà remarqué au chapitre précédent.

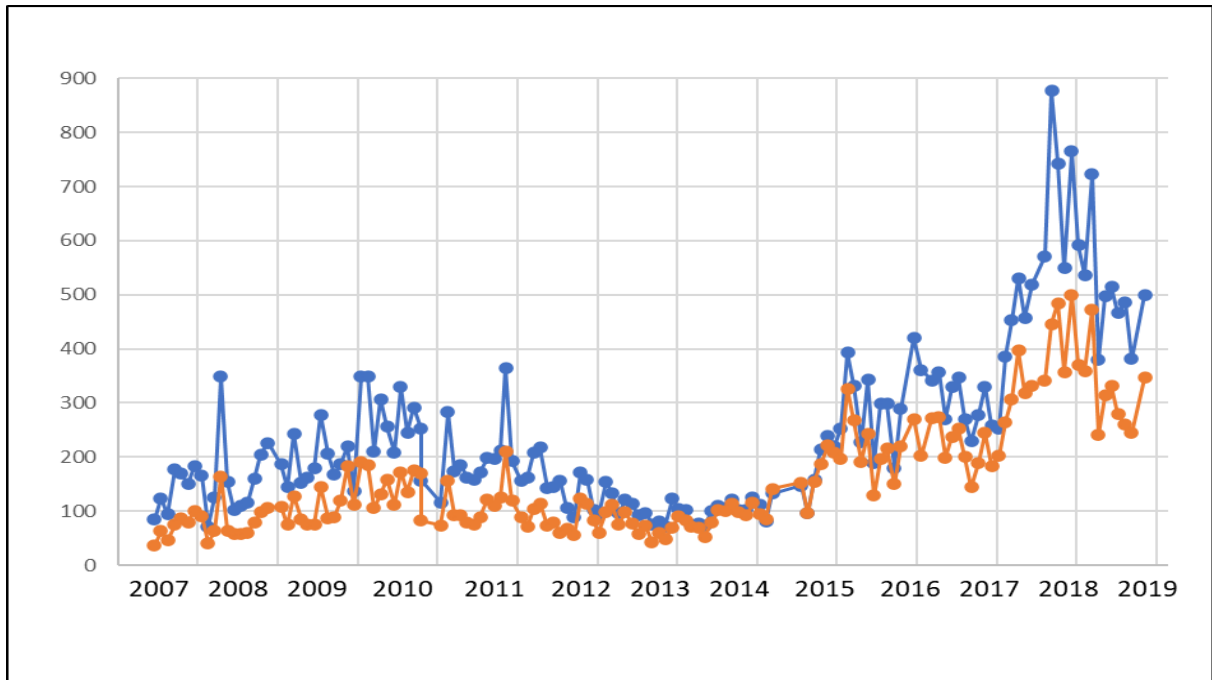


Figure 2 : En bleu, courbe de la fréquence des événements des régions polaires (Nord + Sud) exprimée en nombre d'événements par 24 heures et en orange, courbe de la fréquence des événements des régions de haute latitude (Nord+Sud). Valeurs mensuelles.

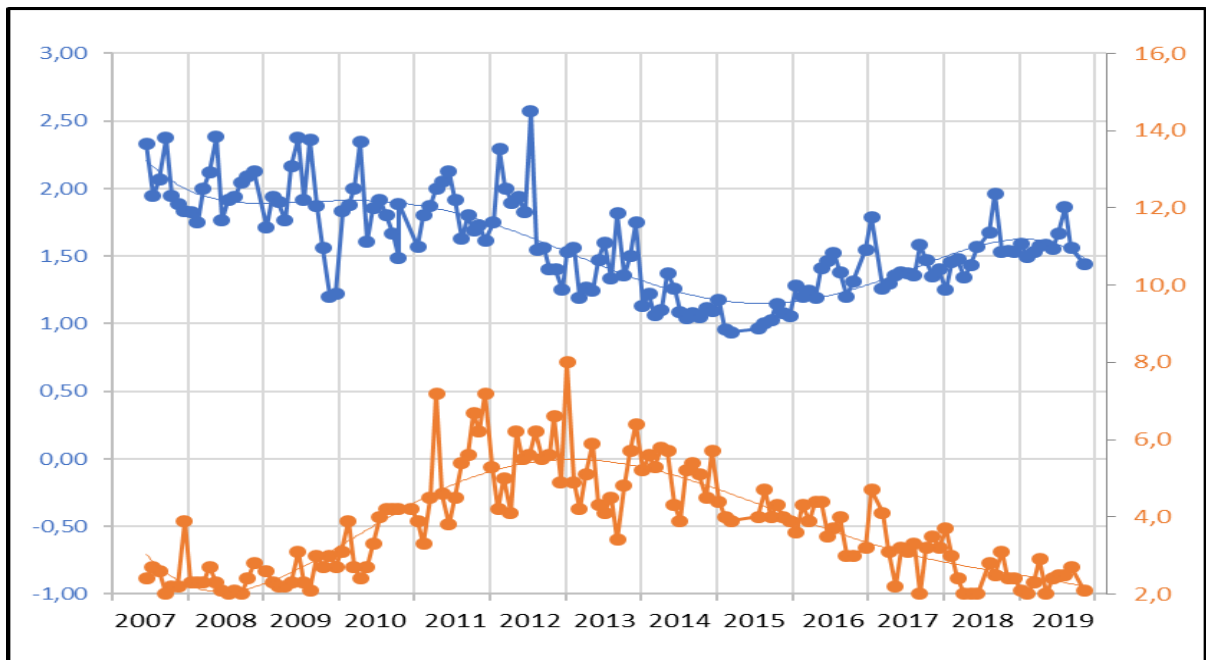


Figure 3 : En bleu, l'activité relative dans les régions polaires (Nord+Sud) et dans celles de haute latitude (1 est la valeur d'équilibre atteinte brièvement 2 ans après le maximum du cycle) et en orange, l'activité hémisphérique. Les valeurs sont mensuelles.

Asymétries Nord/Sud

L'activité polaire présente une asymétrie bien marquée entre le Nord et le Sud comme le montre la figure 4. On retrouve une propriété déjà étudiée sur le cycle 23 avec les données HACO (2). Au cours du cycle 24, les régions polaires Sud ont été sensiblement plus actives que celles du Nord, tout au long du cycle. Cette propriété s'inverse en 2007-2008, 2014 et 2018-2019. Les variations dans le temps de l'asymétrie Nord/Sud de l'activité polaire est en opposition de phase bien marquée avec celle de l'activité hémisphérique nord-sud. Nous nous interrogeons sur la signification de cette très visible opposition de phase. Dans les périodes où l'activité polaire Nord est plus forte que l'activité polaire Sud, l'activité des taches dans l'hémisphère Sud est plus forte que celle dans l'hémisphère Nord et vice-versa.

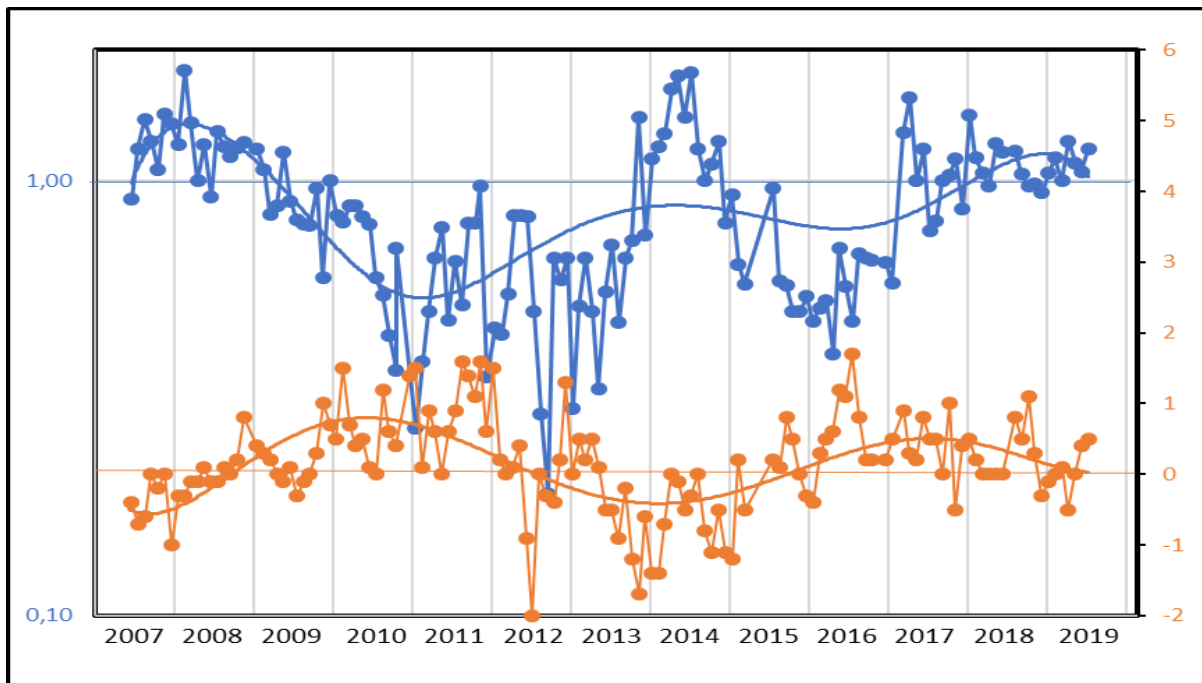


Figure 4

En bleu, asymétrie Nord/Sud de la fréquence des événements polaires (1 est la valeur d'équilibre) et en orange, asymétrie (Nord-Sud) de l'activité hémisphérique (0 est la valeur d'équilibre). Les valeurs sont mensuelles.

Sur cette période de 12 ans l'activité dans les deux régions polaires Nord et Sud ont eu sensiblement la même évolution (figure 5), mais les moments de l'inversion de l'asymétrie des deux hémisphères correspondent à des décalages momentanés de ces courbes. Les variations sont de plus grande amplitude pour le Sud que pour le Nord, mais ces deux courbes montrent une similitude de leur modulation et n'ont pas retrouvé leur niveau initial à la fin de la période de 12 ans.

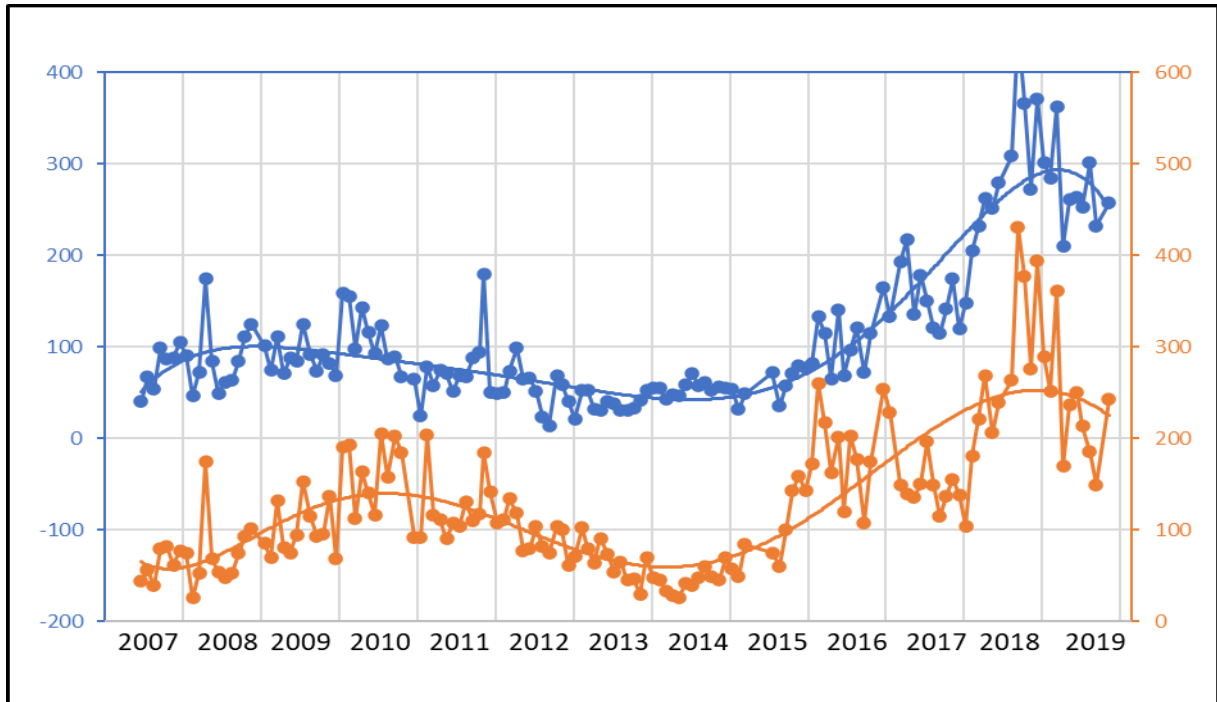


Figure 5
en bleu évolution de la fréquence des événements polaires Nord et en orange Sud. Les valeurs sont mensuelles.

Conclusion

Les régions de haute latitude et particulièrement les régions polaires sont perturbées par de nombreux phénomènes actifs dont la fréquence varie fortement suivant les phases du cycle des taches, majoritairement à contre sens et avec un décalage dans le temps de une à deux années. Leurs propriétés font penser que l'ensemble de ces phénomènes constituent une composante importante de l'activité solaire, décalée de plusieurs années par rapport à celle du cycle des taches. Si l'on considère les questions de la libération d'énergie et de la circulation des masses liées à ces phénomènes, la description de l'activité solaire se doit d'inclure les phénomènes de haute latitude. Il sera intéressant dans l'avenir de faire une estimation de l'apport d'énergie dans la couronne solaire due à l'activité dans les régions de haute latitude, mais nos observations ne permettent pas encore de le faire avec suffisamment de précision. La composante poloïdale du champ magnétique solaire atteint son maximum dans la période du minimum du cycle des taches. La composante toroïdale est alors à son minimum. Le champ poloïdal diminue ensuite et passe par un minimum et s'inverse alors au moment du maximum du cycle des taches. Les données d'observation analysées ici illustrent ce phénomène de balancier entre la composante poloïdale du champ solaire dans laquelle se déroulent les nombreux petits phénomènes actifs des régions de haute latitude et la composante toroïdale dans laquelle se manifestent les grands phénomènes de l'activité solaire au cours du temps. Ainsi, l'activité dans les régions de haute latitude contre balance dans une proportion qui reste à vérifier l'activité classique participant au cycle des taches aux latitudes plus basses.

12 ans après le début de nos observations, l'activité de haute latitude n'est pas encore revenue à son niveau initial. Nous avons vérifié que ce n'était pas dû à un effet instrumental, les caractéristiques des observations, les paramètres observés, les méthodes d'analyse étant restés à l'identique. L'activité de haute latitude semble due à des facules polaires liées à de petites régions de champ magnétique photosphérique évoluant rapidement, son évolution dans le temps présentant des similitudes avec celle des facules polaires (3, 7). Ces régions seraient alors responsables des petits phénomènes rapides que nous observons et on ne peut écarter l'hypothèse qu'elles auraient été plus nombreuses en 2019 que 12 ans plus tôt. On peut aussi y voir une relation avec le fait, comme il a été souligné dans l'introduction de ce texte, que l'on a vu une décroissance de l'activité des taches au cours des trois cycles précédents, concernant toutes les phases de ces cycles. L'activité de haute latitude variant principalement à contre sens de l'activité des taches pourrait expliquer que l'activité constatée durant cette période de minimum soit plus élevée qu'il y a 12 ans puisque l'activité des taches s'est globalement réduite. Les observations des prochaines années nous montreront si l'activité de haute latitude est cyclique ou non. Si cette activité est cyclique, nous ne pouvons pas pour le moment en connaître sa période, mais elle apparaît supérieure à celle du cycle des taches. Cela rappelle les conclusions de plusieurs études concernant l'activité de la basse couronne solaire (4, 5, 6) qui mentionnaient déjà la possibilité d'un cycle solaire plus long prenant racine dans les régions de haute latitude.

Les *Observateurs Associés* de l'Observatoire Midi-Pyrénées poursuivent leurs observations et nous espérons qu'elles nous permettront d'affiner notre vision de l'activité solaire. Il sera important de vérifier les liens probables entre ces petits phénomènes rappelant de petites éjections de matière ou de petites éruptions et le vent solaire, ainsi qu'avec les points brillants visibles dans le rayonnement X localisés dans les trous coronaux. La sonde *Parker Solar Probe* et dans quelques années la sonde *Solar Orbiter* qui vient de s'élancer vers le Soleil, pourront nous apporter des informations passionnantes.

Notes

1. Groupement Français pour l'Observation et l'Étude du Soleil (astrosurf.com/gfoes)
2. Noëns J.C., Wurmser O., 2000, *Astrophysics and Space Science*, 273, 17
3. Makarov, V.I., Leroy, J.L., Noëns, J.C., 1987, *Soviet Astronomy*, 31, 560
4. Trellis M., 1963, *C.R. Acad. Sci.*, 257, 52
5. Legrand J. P., Simon P. A., 1981, *Solar Physics*, 70, 173
6. Leroy J. L., Noëns J. C., 1983, *Astron. Astrophys.*, 120, L1-L2
7. Li, K., Irie, M., Wang, J., Xiong, S., Yun, H., Liang, H., Zhan, L., Zhao, H. : 2002, *Pub. of the Astronomical Society of Japan*, 54, issue 5

Site des Observateurs Associés : <https://climso.fr>

Base de données solaires : <http://bass2000.obspm.fr/home.php>

Archives de l'imageur CLIMSO : <http://climso.irap.omp.eu/data/index.html>

Encadré1

Les *Observateurs Associés* (O.A.) forment une équipe d'une soixantaine d'astronomes amateurs, associés au Service d'Observation Solaire de l'*Observatoire Midi-Pyrénées*. Ce

Service d'Observation, installé au Pic du Midi, a été fondé en 1994 et dirigé par Jacques-Clair Noëns, astronome à l'*Observatoire Midi-Pyrénées*, assisté de Raphaël Jimenez, jusqu'en 2010, puis par Laurent Koechlin et depuis 2018 par Frédéric Pitout. Depuis 1999, les O.A. sont regroupés en une association éponyme présidée actuellement par Franck Vaissière. Les *Observateurs Associés*, se relaient toute l'année au Pic du Midi pour assurer une observation du soleil en continu. Grâce à une instrumentation dédiée (HACO le coronographe imageur H-alpha jusqu'en 2007 puis l'instrument multi-longueurs d'onde CLIMSO) et un ensemble de procédures de fonctionnement, ils assurent en permanence depuis 1994 une surveillance quotidienne de l'activité du Soleil. Leur travail consiste à réaliser l'acquisition simultanée et régulière d'images numériques, tant de la couronne solaire que de la surface du disque dans différentes longueurs d'onde. Afin de mettre en évidence le caractère dynamique du soleil, ils réalisent des séquences vidéo à partir de l'ensemble des images acquises. Toutes ces informations, images et films, alimentent deux bases de données solaires, Bass2000 et l'OVGSO (Observatoire Virtuel Grand Sud-Ouest), mises toutes deux à la disposition de l'ensemble de la communauté scientifique mondiale ainsi que du public. Pour assurer leurs missions d'observation ainsi que les développements de leur instrumentation, les *Observateurs Associés* bénéficient depuis 1999, sous forme d'un parrainage, du soutien financier de l'entreprise FIDUCIAL, fondée en 1970 et présidée par Christian Latouche.

Encadré 2

Cette étude sur les pôles du soleil est le fruit d'une collaboration étroite entre *les observateurs associés* et les services scientifiques et techniques de l'Observatoire Midi-Pyrénées. Elle est menée depuis plus de 10 ans par un groupe de 4 personnes, Jacques-Clair Noëns, Claude Frelat, Odile Wurmser et Géraldine Martial-Pedezert. Claude Frelat a tenu une place particulièrement importante dans cette étude. Sans relâche, avec assiduité, sérieux et passion il a largement contribué à l'analyse des journées d'observation. Membre actif des observateurs associés depuis le début en 1994, membre fondateur et trésorier de l'association depuis sa création en 1999, gaieté, humilité et bienveillance le caractérisaient. Claude nous a quittés subitement le 16 mars 2020 et nous tenons ici, au travers de cet article, à lui rendre un chaleureux hommage.

Remerciements :

- Les responsables scientifiques du service d'observation depuis 2010, Laurent Koechlin, Arturo Lopez Ariste et Frédéric Pitout, astronomes à l'Observatoire Midi-Pyrénées
- Raphaël Jimenez, responsable technique du service d'observation
- L'ensemble des Observateurs Associés pour leur travail constant et sérieux et la qualité de leurs observations
- Martine Lafon, ingénieure informaticienne responsable de l'informatique de CLIMSO et responsable technique de Bass 2000-Tarbes
- David Romeuf, O.A., maître d'œuvre de CLIMSO
- Maurice Audejean, O.A. impliqué dans les programmes informatiques de CLIMSO
- Alain Bücher, géophysicien, premier président de l'association et membre fondateur
- Jean-Louis Leroy, astronome, pour son regard scientifique sur le travail des O.A et sur cette étude
- Les équipes techniques et administratives de l'OMP
- Christian Latouche, pour le soutien financier indéfectible de FIDUCIAL depuis 1999