Variabilité de l'activité solaire et impacts climatiques : le cas des derniers siècles

Auteur :
DELAYGUE Gilles, Maître de conférences à l'Université Grenoble-Alpes, Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement. Fait maintenant partie de l'Institut des géosciences de l'environnement.

23-03-2018

La source d'énergie essentielle pour la surface de la Terre est le flux d'énergie solaire. Si le flux reçu à la surface de la Terre en un lieu donné varie considérablement, notamment saisonnièrement, le flux rayonné par le Soleil est, lui, relativement constant. Toutefois, des indices de variations d'activité du soleil sont connus depuis très longtemps, et l'hypothèse que cette activité solaire peut affecter notre climat est ancienne. Que connaît-on de cette activité du Soleil à l'échelle du dernier millénaire ; quelle activité peut influencer le climat ; quelles influences sont discernables ?

1. Le soleil, une étoile variable

Le flux d'énergie solaire reçu à la surface de la Terre, l'**insolation**, varie essentiellement à cause des mouvements de la Terre sur son orbite, à l'origine de l'alternance diurne et des saisons. Le flux d'énergie rayonnée par le Soleil, l'**irradiance**, a longtemps été considéré comme constant, d'où son appellation de « constante solaire ». Il a fallu attendre les mesures extrêmement précises obtenues par satellites pour démontrer que **cette « constante » est en fait variable, mais très faiblement** (de l'ordre de 0,1 % aux échelles de temps en jeu ici).

Le principal indice d'une activité propre du Soleil en sont les **taches solaires**, ces points sombres épisodiques à la surface du

Soleil. Ces taches étaient connues depuis très longtemps, mais c'est la diffusion de la lunette astronomique, au tout début du 17e siècle, qui a permis des comptages réguliers de ces taches [1]. Ces comptages ont mis progressivement en évidence un cycle très marqué à 11 ans ainsi que des variations à l'échelle du siècle.

Plus récemment, d'autres expressions de cette activité solaire ont été mises en évidence, notamment les éruptions solaires, phénomènes extrêmement courts (quelques heures au plus) d'éjection de rayonnement et de particules très énergétiques, qui sont notamment responsables des aurores boréales. (Lire Les énergies solaires)

1.1. Le cycle à 11 ans (dit « de Schwabe »)

L'activité convective et magnétique des couches les plus externes du soleil, photosphère, chromosphère et couronne, présente des variations marquées et cycliques de son activité. Lorsque l'activité est forte, des zones plus chaudes et plus rayonnantes, les facules, se forment à la 'surface' visible du soleil (photosphère) accompagnées de zones moins chaudes et moins rayonnantes, les taches sombres. Ces zones ont une existence de l'ordre de la semaine, et accompagnent la rotation du soleil en 27 jours. L'atmosphère solaire (chromosphère et couronne) est également plus chaude et plus rayonnante tout autour du soleil. Des éruptions se déclenchent plus fréquemment à partir de la couronne.

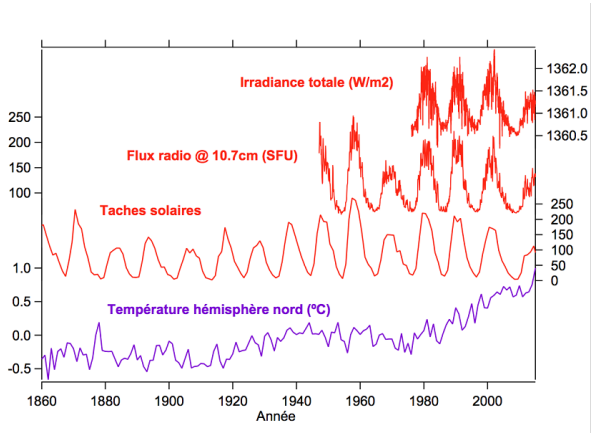

Figure 1. Variations de l'activité solaire et de la température de surface de la Terre au cours des derniers 150 ans environ. Le flux radio mesure l'activité magnétique du soleil. [Sources : PMOD/WRC pour l'irradiance ; Hadley Centre/UEA CRU pour la température (version HadCRUT4) ; Centre de météo spatiale du Canada pour le flux radio à 10,7cm ; Clette et al. 2014 (voir réf. [1]) (WDC/SILSO) pour les taches solaires annuelles. © G. Delaygue].

Les taches, indice le plus visible de cette activité, ont été comptées depuis le début du 17e siècle (vers 1610) avec la mise au point de la lunette astronomique. Une série quasi-continue, annuelle à quotidienne, a pu être reconstituée à partir d'archives de comptage [1]. Cette série du nombre de taches solaires montre une cyclicité très marquée à 11 ans, avec une durée des cycles variable de 9 à 13 ans (Figures 1 et 2).

Des radiomètres embarqués sur des satellites mesurent précisément les variations de l'irradiance solaire associées à cette activité depuis 1978 environ. Ces mesures indiquent une variation de 1 W/m^2, soit **environ 0,1%, entre les maxima et minima** de l'irradiance totale solaire (Figure 1). Ces variations sont plus fortes, relativement, dans les longueurs d'onde des ultra-violets, de l'ordre de 1 à 10%, même si leurs valeurs précises restent débattues [2].

1.2. Variations séculaires de l'activité solaire (variations « de Gleißberg »)

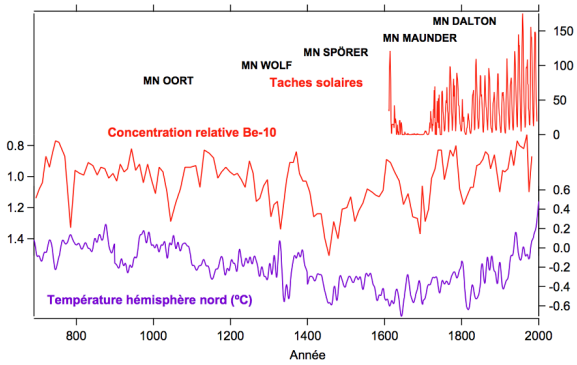

Figure 2. Activité solaire (taches solaires et isotope cosmogénique Be-10) et température de surface de la Terre au cours des derniers 1200 ans environ. Les minima solaires, en noir, correspondent aux périodes avec peu de taches et des concentrations élevées en Be-10. [Sources : Hoyt & Schatten (1997) pour les groupes de taches solaires (distribués par NOAA/NCDC) ; Mann et al. (2009) pour la température de l'hémisphère nord (anomalie) ; Delaygue & Bard (2011) pour les variations relatives de l'isotope Be-10 dans la glace (échelle inversée). © G. Delaygue].

Les séries de comptage des taches solaires montrent que les maxima des cycles à 11 ans ont fluctué depuis 4 siècles, alors que les minima sont restés stables, avec une quasi-absence de taches. On observe ainsi des périodes caractérisées par de très forts maxima, périodes qui ont été appelées les « **Grands maxima** ». Nous sortons du « Grand maximum moderne », qui a culminé dans les années 1960-70. Des périodes de très faibles maxima, avec très peu de taches, ont été appelés les « Grands minima ». Sur la période couverte par la série de comptage des taches, le plus important est le **Grand minimum de Maunder**, des années 1645 à 1715 environ, au cours duquel très peu de taches ont été observées. Ces fluctuations d'échelle de temps séculaire sont souvent dénommées les cycles de Gleißberg (Figure 2).

Si le nombre de taches solaires est un bon indicateur, quantitatif, de l'activité solaire, il présente néanmoins le biais important d'être nivelé par le bas, les taches étant quasi-absentes pendant les Grand minima. Or la période couverte par les satellites ne comprend pas de Grand minimum : par conséquent on ne connaît pas les valeurs minimales de l'irradiance, ni son amplitude totale à cette échelle de temps du siècle.

1.3. Variabilité séculaire à millénaire : des indices indirects de l'activité solaire

Avant ces enregistrements directs de l'activité solaire, il faut **utiliser des indices indirects** ('proxies' en anglais). Les plus fiables sont les isotopes cosmogéniques, Carbone-14 et Béryllium-10, dont la production, dans la haute atmosphère terrestre, est modulée par le champ magnétique solaire (Figure 2). Ces isotopes sont enregistrés dans les cernes d'arbres, et la glace des calottes polaires et des glaciers de montagne. Leur concentration sont interprétées en terme d'activité du soleil, mais uniquement de variations relatives. Pour obtenir des variations absolues, par exemple de l'irradiance solaire totale (en W/m^2), il faut donc **calibrer ces concentrations** par des variations de l'activité connues par ailleurs, soit mesurées (mais sur une période récente, très courte), soit estimées (basées sur des modèles physiques de l'activité du soleil). [3]

Ces indices indirects restent toutefois relativement imparfaits, tant en terme de fiabilité que de résolution temporelle. Notamment le cycle solaire à 11 ans reste très mal résolu dans les longs enregistrements de ces 'proxies', même si des travaux récents ont pu le mettre en évidence sur le dernier millénaire [4].

Au cours du dernier millénaire, ces enregistrements des 'proxies' montrent que l'activité solaire a été faible pendant non seulement le Grand minimum de Maunder mais aussi, et peut-être plus faible encore, pendant le Grand minimum de Spörer, au 15^{e} siècle. Le Grand maximum moderne, à la fin du 20^{e} siècle, semble un peu plus élevée que le Grand maximum médiéval du 8^{e} siècle (Figure 2).

2. Impacts du cycle solaire à 11 ans sur le climat terrestre

Suite à la mise en évidence des cycles solaires à 11 ans, d'innombrables études se sont attachées à trouver des corrélations avec des variations du climat ou d'autres paramètres [5]. Peu de ces corrélations se sont avérées significatives et ont résisté à l'analyse [6].

2.1. Impacts à la surface de la Terre

Il semble clair maintenant que les variations d'irradiance dues aux cycles de 11 ans sont trop faibles et trop rapides pour engendrer des variations de température importantes à la surface de la Terre, compte tenu de son inertie thermique. En effet, l'amplitude maximale de l'irradiance, de l'ordre de 1 W/m^2 au cours d'un cycle solaire, modifie le flux solaire absorbé par la surface d'environ 0,14 W/m^2, en prenant en compte le facteur géométrique de dilution sur la sphère terrestre (facteur 1/4),

l'albedo global (0,3), et l'absorption par l'atmosphère (environ 20%). L'impact sur une moyenne hémisphérique ou globale de la température de surface semble tout juste décelable, de l'ordre de 0,1ºC par cycle. [Lien : Rubrique 'climat' / Forçages et effets rétroactifs ; sensibilité climatique]

Toutefois, une corrélation persistante a pu être montrée entre ces cycles solaires et les pression et température de surface dans certaines régions du Pacifique [7]. Il semble également que ce cycle solaire interagit avec d'autres cycles internes au système climatique, notamment ceux de même échelle de temps décennale, l'Oscillation pacifique décennale et l'Oscillation nord atlantique [8]. A l'échelle plus régionale, l'activité solaire pourrait privilégier certains régimes synoptiques, notamment en hiver les régimes de blocage qui favorisent les advections d'air froid polaire sur l'Europe de l'ouest [9].

2.2. Impacts sur la stratosphère

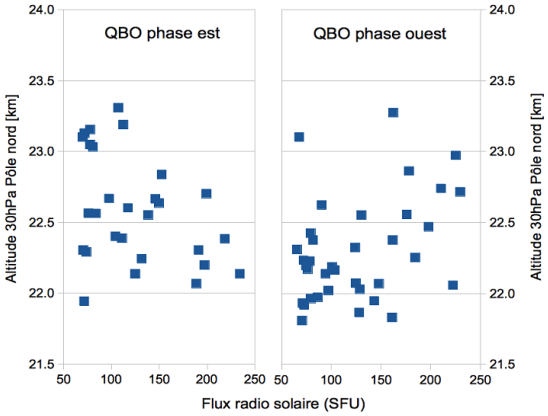

Figure 3. L'impact de l'activité solaire sur la pression atmosphérique au Pôle nord dépend de la phase de la QBO. Relation entre l'altitude du géopotentiel 30hPa au Pôle nord (moyenne janvier-février ; réanalyse NCEP) et le flux radio solaire à 10,7cm, sur la période 1948-2015, avec une distinction de la direction des vents jet de basse stratosphère (phases de la QBO). [source : © G. Delaygue]

Au contraire de la surface, ce **signal solaire à 11 ans est bien marqué dans la stratosphère**. Des variations de la température, du géopotentiel, et de la circulation notamment méridienne (dite 'de Brewer-Dobson'), sont ainsi bien documentées (Figure 3). Le mécanisme en jeu, testé à l'aide de modèles décrivant les processus physiques et chimiques [10], est l'absorption forte du rayonnement UV par le cycle de l'ozone, absorption qui réchauffe l'air et modifie les gradients méridiens de la température. Les variations relatives du rayonnement UV au cours d'un cycle solaire sont fortes par rapport aux variations de l'irradiance totale (10 à 100 fois plus fortes, relativement). Ces impacts sur la stratosphère affectent l'intensité du vortex polaire arctique, notamment en hiver, qui lui-même affecte la basse troposphère aux hautes et moyennes latitudes. Ces impacts du cycle solaire sont modulés par le sens de circulation du courant jet stratosphérique, un sens qui s'inverse environ tous les deux ans ('Oscillation quasi-biennale') [11] (Figure 3).

2.3. Impacts possibles sur la formation des nuages

L'activité solaire module non seulement le rayonnement du soleil mais également le flux de particules énergétiques qui pénètrent l'atmosphère terrestre. Il s'agit d'une part du rayonnement cosmique galactique, qui est dévié par le champ magnétique solaire (qui dépend lui-même de l'activité du soleil), d'autre part des particules émises par le soleil lui-même notamment lors d'éruptions. Ces particules énergétiques interagissent avec les molécules de l'atmosphère pour former des ions. L'hypothèse que cette ionisation ait un impact climatique date de plus de 50 ans [12], mais reste très discutée, tant sur le plan théorique que sur celui des observations. Le mécanisme le plus souvent avancé est que ces ions favoriseraient la formation de noyaux de condensation nécessaires à la formation des nuages.

Le rôle des nuages sur les échanges de chaleur dans le système climatique est fondamental, via les flux radiatifs, dans les longueurs d'onde visibles et infra-rouge, mais aussi les flux de chaleur latente. La modulation solaire du flux de particules énergétiques a un impact climatique direct très faible, mais une amplification très forte pourrait exister via ce contrôle sur les nuages. Les différentes corrélations proposées entre les flux de particules énergétiques et la couverture nuageuse restent toutefois très débattues [13].

3. Impacts de la variabilité séculaire sur le climat : le dernier millénaire

Le Grand minimum solaire de Maunder (~1645-1715), bien connu par les taches solaires, a eu lieu au cours d'une période

qualifiée en Europe de « Petit âge de glace » par les historiens [14]. Cette période fraîche reste toutefois mal définie temporellement, probablement parce que la variabilité décennale était forte, et aussi parce qu'elle dépend des critères et régions pris en compte. Dans son acceptation large, le Petit âge de glace s'étend du 15ie siècle jusqu'au milieu du 19ie siècle, une fin marquée par le recul massif des glaciers alpins.

L'interprétation d'archives historiques et naturelles (cernes d'arbres, notamment) en terme de conditions climatiques locales (température et/ou précipitations) a confirmé que le Petit âge de glace était un phénomène détectable à l'échelle de l'hémisphère nord, mais avec une amplitude faible (de l'ordre de 0.2ºC) par rapport à la variabilité régionale et temporelle (décennies plus froides et plus chaudes).

Des modèles climatiques permettent de tester l'importance respective des différents facteurs de changements climatiques, notamment la variabilité solaire. Ces facteurs sont pris en compte par le déséquilibre radiatif dont ils sont responsables ('forçage climatique', [lien : point 1.3]). Les études récentes convergent vers une contribution faible mais décelable du soleil aux variations de la température de surface, des échelles régionales à globale. La contribution des fortes éruptions volcaniques à ces variations de température a été revue à la hausse par ces études, y compris aux échelles décennale voire centennale. [15]

4. Conclusion

Il semble donc vraisemblable que l'activité solaire a eu des impacts climatiques plus prononcés à l'échelle régionale qu'à l'échelle globale, aux échelles de temps considérées ici. De meilleures reconstitutions et simulations de ces variations climatiques régionales, et indépendamment des forçages climatiques, sont nécessaires pour comprendre leurs relations. Ces études des derniers siècles permettent d'envisager l'impact climatique du soleil au cours des prochains siècles, notamment avec l'hypothèse d'un retour à un grand minimum : cet impact devrait rester faible à l'échelle globale par rapport à ceux des forçages anthropiques (gaz à effet de serre, albedo), par contre à l'échelle régionale il jouera toujours un rôle important dans la variabilité climatique. [16]

Références et notes

Photo de couverture: Augmentation des températures mondiales de 1950 à la fin de 2013 [source : NASA (Public domain), via Wikimedia Commons]

[1] Clette, F., L. Svalgaard, J. M. Vaquero, et E. W. Cliver (2014). Revisiting the Sunspot Number. *Space Science Reviews*, **186**, 35-103. http://dx.doi.org/10.1007/s11214-014-0074-2

[2] Ermolli, I., et al. (2013). Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13**, 3945-3977. http://dx.doi.org/10.5194/acp-13-3945-2013

[3] Delaygue, G. and E. Bard (2011). An Antarctic view of Beryllium-10 and solar activity for the past millennium. *Climate Dynamics*, **36**, 2201-2218. http://dx.doi.org/10.1007/s00382-010-0795-1

[4] Mélanie Baroni, CEREGE, communication personnelle, décembre 2015

[5] Herschel, W. (1801). Observations Tending to Investigate the Nature of the Sun, in Order to Find the Causes or Symptoms of Its Variable Emission of Light and Heat; With Remarks on the Use That May Possibly Be Drawn from Solar Observations. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **91**, 265-318, http://dx.doi.org/10.1098/rstl.1801.0015

[6] Pittock, A. B. (1978). A critical look at long-term Sun-weather relationships, *Review of Geophysics*, **16**(3), 400–420, http://dx.doi.org/10.1029/RG016i003p00400

[7] Christoforou, P. and S. Hameed (1997). Solar cycle and the Pacific 'centers of action'. *Geophysical Research Letters*, 24, 293-296. http://dx.doi.org/10.1029/97GL00017

[8] Van Loon, H. et G. A. Meehl (2014). Interactions between externally forced climate signals from sunspot peaks and the internally generated Pacific Decadal and North Atlantic Oscillations. *Geophysical Research Letters*, **41**, http://dx.doi.org/10.1002/2013GL058670

[9] Barriopedro, D., García-Herrera, R. and Huth, R. (2008). Solar modulation of Northern Hemisphere winter blocking. *Journal*

of Geophysical Research, **113**(D14), D14118, http://dx.doi.org/10.1029/2008JD009789.

[10] Marchand, M. et al. (2012). Dynamical amplification of the stratospheric solar response simulated with the Chemistry-Climate Model LMDz-Reprobus. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **75-76**, 147-160, http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2011.11.008

[11] Labitzke, K. (1987). Sunspots, the QBO, and the stratospheric temperature in the north polar region. *Geophysical Research Letters*, **14**(5), 535-537. http://dx.doi.org/10.1029/GL014i005p00535

[12] Ney, E. P. 1959. Cosmic Radiation and the Weather. *Nature*, **183**(4659), 451-452, http://dx.doi.org/10.1038/183451a0

[13] Calogovic, J., Albert, C., Arnold, F., Beer, J., Desorgher, L. and Flueckiger, E. O. (2010). Sudden cosmic ray decreases: No change of global cloud cover. *Geophysical Research Letters*, **37**(3), http://dx.doi.org/10.1029/2009GL041327

[14] Eddy, J. A. (1976). The Maunder Minimum. *Science*, **192**, 1189-1202, http://dx.doi.org/10.1126/science.192.4245.1189

[15] Schurer, A. P., Tett, S. F. B. and Hegerl, G. C. (2014). Small influence of solar variability on climate over the past millennium. *Nature Geoscience*, **7**(2), 104-108, http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2040

[16] Ineson, S., Maycock, A. C., Gray, L. J., Scaife, A. A., Dunstone, N. J., Harder, J. W., Knight, J. R., Lockwood, M., Manners, J. C. and Wood, R. A. (2015). Regional climate impacts of a possible future grand solar minimum. *Nature Communications*, **6**, http://dx.doi.org/10.1038/ncomms8535

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur :** DELAYGUE Gilles (2018), Variabilité de l'activité solaire et impacts climatiques : le cas des derniers siècles, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=1748

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.