

Influence du soleil sur le climat

Variations du forçage radiatif solaire

Édouard Bard Il a fallu attendre la fin des années 70 pour obtenir les premières données précises sur l'irradiance solaire mesurée à partir des satellites. La "constante solaire", introduite par le physicien français Claude Pouillet en 1838, fluctue à court terme et son cycle de 11 ans se caractérise par une variation de l'irradiance totale d'environ 0,1 %. Paradoxalement, l'éclairement augmente avec le nombre de taches solaires : les taches assombrissent le Soleil, mais leur effet est plus que compensé par celui des zones brillantes, les facules, qui leur sont associées.

La compilation des mesures brutes réalisées depuis 1978 par les différents satellites présente des difficultés car les séries ne couvrent pas la totalité des trois derniers cycles. Les travaux récents convergent vers une courbe synthétique montrant que le cycle de onze ans se superpose à une ligne de base évoluant faiblement, probablement à la baisse. Les données des satellites montrent aussi que les variations d'irradiance solaire ne sont pas homogènes sur tout le spectre, avec notamment une plus forte amplitude relative pour les rayons ultra-violet (avec des conséquences importantes sur le chauffage de la stratosphère et sur la formation de l'ozone stratosphérique par des réactions photochimiques).

Soleil vu par le télescope à ultraviolet du satellite SOHO © NASA-ESA

Pour remonter au-delà des premières mesures par les satellites, il faut étudier d'autres données comme les observations des taches solaires, de la variabilité géomagnétique et des nucléides cosmogéniques. Depuis 20 ans, de nombreux auteurs ont montré que le nombre, et d'autres caractéristiques des taches solaires, peuvent être utilisés pour reconstituer l'irradiance solaire au cours des 3 à 4 derniers siècles. Il est aussi possible de reconstituer l'activité solaire en étudiant l'abondance sur Terre des cosmonucléides. Ces isotopes sont formés par interaction du rayonnement cosmique galactique avec les molécules de l'atmosphère. Les protons du rayonnement primaire étant des particules chargées, la production de cosmonucléides est fortement modulée par l'intensité des champs magnétiques du Soleil et de la Terre. Les géochimistes mesurent l'abondance de ces isotopes dans des archives naturelles comme les glaces polaires (pour le béryllium 10 et le chlore 36), les anneaux d'arbre et les coraux (pour le carbone 14). Le principal enseignement de ces études est que les minima solaires sont nombreux et que le Soleil a passé une partie importante des derniers millénaires en phases calmes (de plusieurs décennies jusqu'au siècle), lorsqu'il présentait une activité magnétique et donc une irradiance plus faible.

Corrélations empiriques entre l'activité solaire et les séries climatiques

La première recherche d'une correspondance systématique entre l'activité solaire et le climat date de plus de deux siècles avec les travaux de l'astronome anglais William Herschel. D'innombrables travaux ont été publiés depuis sur ce sujet qui reste l'objet de vives controverses pour plusieurs raisons majeures : les corrélations détectées ne se sont pas poursuivies dans le temps, les auteurs n'ont pas tenu compte de la superposition d'autres forçages sur les mêmes échelles de temps ou d'incertitudes et de biais systématiques dans les données climatiques utilisées, ou bien encore, les outils statistiques ont été mal utilisés.

Il existe cependant des exemples convaincants de liens entre l'activité solaire et le climat concernant différentes échelles de temps et plusieurs compartiments du système climatique. Un exemple classique est l'influence du cycle de 11 ans sur les températures et les vents de la stratosphère. L'impact de ce cycle sur la dynamique de la troposphère a aussi fait l'objet de nombreuses études, notamment sur de possibles variations systématiques de la géométrie et de l'intensité de la circulation moyenne à grande échelle (cellules de Hadley, courants jets, circulation de Walker).

Depuis la fin des années 90, des auteurs danois ont annoncé avoir identifié le cycle de 11 ans dans les enregistrements de la couverture nuageuse observée par les satellites. Ces travaux ont été focalisés sur plusieurs types de nuages en fonction de leurs altitudes. Néanmoins, les correspondances annoncées n'ont pas été confirmées par les études plus récentes.

L'étude empirique d'un lien Soleil-climat a aussi été conduite pour des échelles de temps encore plus longues, notamment la relation entre les "grands minima" d'activité solaire et la période du Petit Âge glaciaire. De nombreux progrès ont fait suite, notamment par la reconstitution des conditions climatiques des derniers millénaires pour différentes zones géographiques et différents compartiments du système climatique, ainsi que par l'étude de l'activité solaire sur les mêmes échelles de temps à partir des cosmonucléides ¹⁰Be et ¹⁴C.

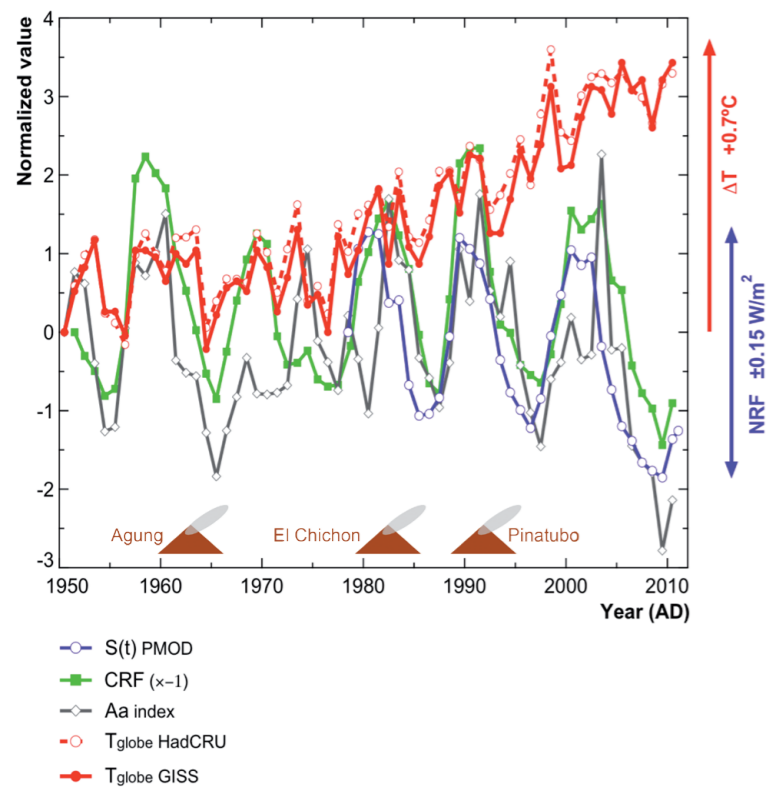
La comparaison des données permet de mettre en évidence l'influence du Soleil, mais aussi d'identifier des complications car le forçage solaire se superpose à plusieurs autres causes naturelles de changement climatique sur les mêmes échelles de temps. Par ailleurs, les enregistrements paléoclimatiques présentent une hétérogénéité spatiale suggérant l'importance de processus régionaux. On doit souligner que les termes évocateurs de Petit Âge glaciaire et d'Optimum médiéval simplifient des réalités contrastées avec d'importantes variabilités temporelles et spatiales.

L'évaluation de la composante solaire dans les séries climatiques passe nécessairement par une analyse statistique multivariée tenant compte des autres causes agissant sur les mêmes constantes de temps : forçages des grandes éruptions volcaniques et des gaz à effet de serre, ainsi que les oscillations intrinsèques au système climatique (par ex. la variabilité ENSO, El-Nino, oscillation australe).

Dans le cadre du partenariat entre le Collège de France et le Collège de Belgique, le Pr Édouard Bard a donné à Bruxelles le 2 décembre 2010 une conférence sur l'effet du soleil sur le réchauffement planétaire.

Pr Édouard BARD
Évolution du climat et de l'océan





Enregistrements des moyennes annuelles de l'activité solaire et des anomalies de température à la surface du globe depuis 1950 : S(t) l'irradiance solaire totale, CRF le flux de rayons cosmiques, aa l'indice d'activité géomagnétique, deux versions des anomalies de température : Tglobe HadCRU de l'Université d'East Anglia et du Hadley Center (UK Met Office) et Tglobe GISS du Goddard Institute for Space Studies de la NASA (New York). Ce diagramme synthétique est simplifié (à l'extrême) en normalisant chaque série temporelle sur toute la période (sauf pour S(t) qui n'est disponible que depuis 1978 et a donc été normalisée sur 1978-2010).

Toutes les courbes ont été traduites verticalement pour partir de zéro afin de se concentrer sur les éventuelles tendances temporelles depuis l'année 1950 (sauf pour S(t) qui part de 0 en 1978). La courbe CRF est inversée pour souligner la corrélation avec les autres indices solaires et car l'hypothèse de Marsh et Svensmark (2000, PRL 85 (23), 5004-5007) est qu'une baisse des rayons cosmiques diminuerait les nuages bas et augmenterait donc la température de surface. NRF représente le forçage radiatif net du Soleil (S(t) divisé par 4 et multiplié par 0,7 pour tenir compte de l'albédo). Seules les courbes Tglobe sont caractérisées par une tendance à la hausse d'environ 0,11°C par décennie.

Les éruptions volcaniques majeures sont responsables de refroidissements transitoires pendant les quelques années suivant ces événements.

Pour plus de détails voir Bard & Delaygue (2008 EPSL 265, 302-307) avec une première version de cette figure (<http://www.ipsl.fr/fr/Pour-tous/Les-dossiers-thematiques/Copenhague-2009-Que-savons-nous-du-climat/Les-forcages-externes-du-systeme-systeme-climatique>).

Ces analyses sont conduites à partir des enregistrements de la température moyenne à l'échelle mondiale ou sur les données régionales pour la période récente mieux documentée.

Les différentes composantes climatiques sont identifiées en étudiant leurs répartitions géographiques et verticales qui constituent des signatures caractéristiques : amplification du réchauffement dans la stratosphère pour une variation solaire, réchauffement stratosphérique et refroidissement troposphérique d'une éruption volcanique, refroidissement stratosphérique et réchauffement troposphérique pour une augmentation de gaz à effet de serre, signatures géographiques de l'ENSO au niveau de l'océan Pacifique et des continents adjacents. À l'échelle globale, l'amplitude thermique du cycle de 11 ans est estimée à environ 0,1 – 0,2°C.

Pour la période récente depuis 1950, il est utile de faire une comparaison au premier ordre pour en déduire que le réchauffement actuel ne peut probablement pas être expliqué par le forçage solaire.

(Voir figure ci-contre). En effet, le forçage solaire, dominé par le cycle de 11 ans, ne présente pas d'augmentation à long terme, que l'on considère les mesures précises d'irradiance sur 30 ans (S(t) en bleu), la modulation des rayons cosmiques (CRF en vert), ou l'activité géomagnétique (aa en gris). Ceci suggère l'influence probable d'autres forçages, notamment celui des gaz à effet de serre dont les concentrations ont augmenté continuellement au cours de la même période.

Mécanismes et amplifications du forçage solaire

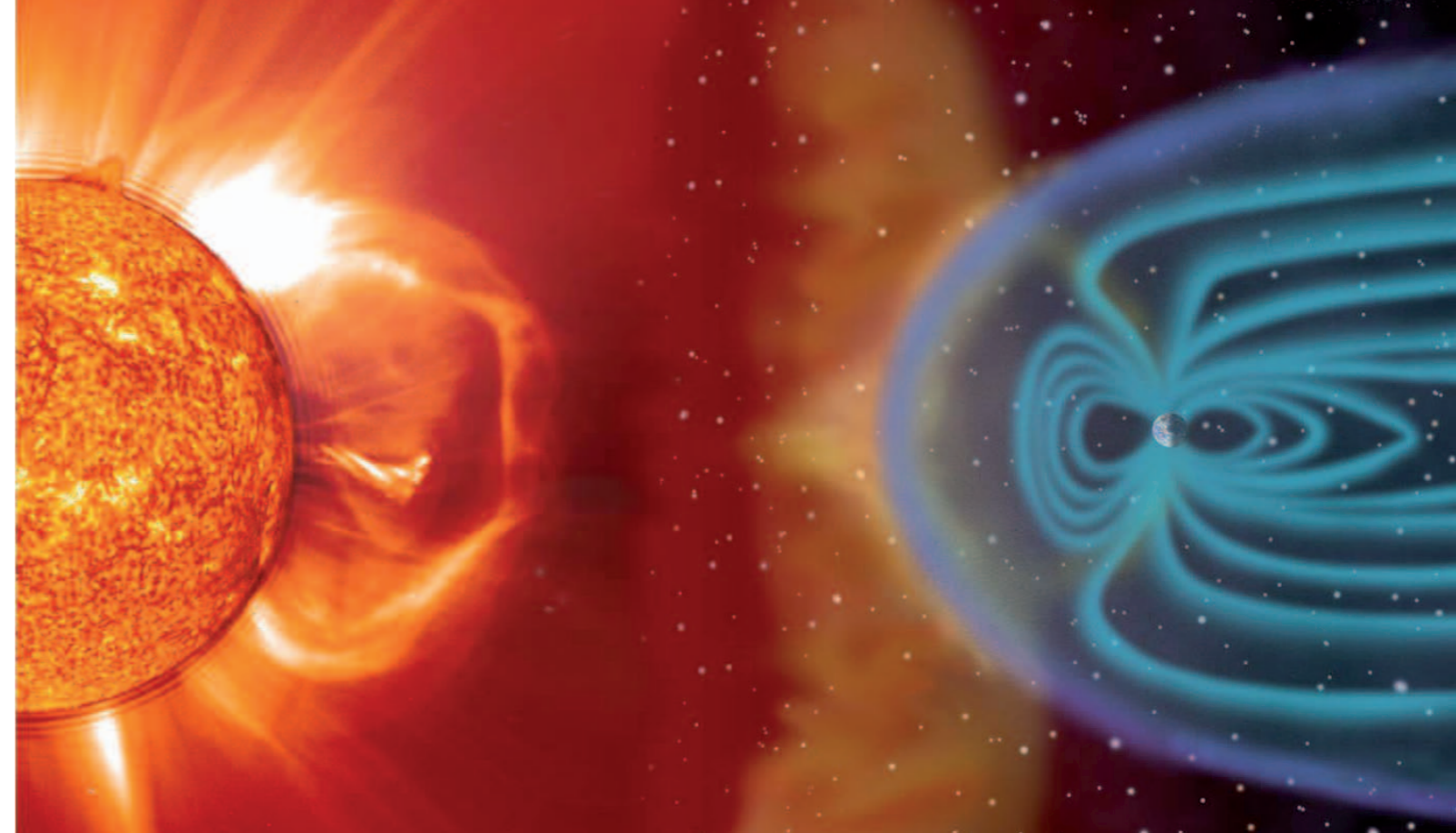
L'approche empirique a évidemment ses limites car certains forçages sont encore mal quantifiés (la composante ultraviolette du spectre solaire) ou restent encore à l'état d'hypothèse (le rôle exact des particules chargées du rayonnement cosmique) ce qui rend difficile leur prise en compte statistique. Par ailleurs, la combinaison de l'influence des forçages ne se résume pas toujours à un cumul arithmétique. En effet, un forçage externe naturel ou anthropique peut aussi influencer les variations intrinsèques comme l'amplitude ou la fréquence d'oscillations climatiques (ENSO et NAO).

La corrélation temporelle entre forçage et climat ne suffisant pas pour établir les liens de causalité, il est important et complémentaire d'envisager une deuxième voie fondée sur les mécanismes et les rétroactions climatiques associées.

Les processus de base sont régis par des lois physico-chimiques et l'évaluation de leur influence sur le climat global et régional peut être réalisée à l'aide de modèles numériques du climat.

La variété des forçages implique que ces modèles possèdent un niveau de sophistication élevée tout en permettant des simulations longues de plusieurs siècles. L'utilisation des modèles de circulation générale permet d'étudier finement les rétroactions climatiques qui amplifient ou atténuent le signal radiatif lié à un forçage particulier ainsi que d'envisager la combinaison multiple des forçages.

L'influence des variations de l'irradiance solaire totale est l'objet d'une abondante littérature depuis les années 70.



Le Soleil et la magnétosphère terrestre (montage artistique de la NASA) © NASA

La prise en compte des variations spectrales (notamment UV) a suivi vers le milieu des années 90. La principale complication réside dans l'utilisation d'un modèle numérique ayant une résolution satisfaisante pour simuler la dynamique de la stratosphère couplée à la troposphère et incluant un module représentant la chimie atmosphérique. Ces simulations permettent de comparer et combiner les influences respectives des variations de l'irradiance solaire totale et des fluctuations spectrales du Soleil.

En plus de ces effets directs, une hypothèse déjà ancienne a été relancée en comparant la nébulosité et le flux de rayons cosmiques. On peut faire le parallèle (simpliste) avec le principe de la "chambre à brouillard", détecteur de physique dans lequel les particules ionisantes se comportent comme des germes de condensation dont les trajectoires se matérialisent par des traînées de gouttelettes. Cette hypothèse a fait grand bruit lorsque l'équipe danoise, déjà mentionnée, a signalé une corrélation positive entre la couverture nuageuse et l'intensité du rayonnement cosmique modulée par le Soleil pendant la période de 1984 à 1991. Les études ultérieures n'ont pas confirmé cette correspondance.

Il faut souligner que l'impact climatique des nuages dépend fortement de leurs propriétés radiatives et donc de leur altitude. La modulation solaire envisagée en 1997 devait induire une diminution des nuages de haute altitude aux latitudes élevées, lors d'une période de forte activité solaire. Or ces nuages de haute altitude ont globalement tendance à chauffer la surface terrestre, et non à la refroidir comme le font les nuages de basse altitude. L'hypothèse était donc incompatible avec l'apparente corrélation entre l'activité solaire et le réchauffement durant une partie du XX^e siècle. Ces auteurs ont ensuite modifié leur analyse en proposant une influence solaire limitée aux nuages de basse altitude dont la couverture semblait mieux suivre les fluctuations solaires. Ce changement d'hypothèse peut surprendre car on s'attendrait plutôt à un effet solaire maximum pour la partie haute de l'atmosphère et non pour sa partie la plus basse dans laquelle les noyaux de condensation abondent déjà.

Plusieurs équipes ont étudié en détail l'hypothèse d'un impact des rayons cosmiques sur la formation de noyaux de condensation et leurs conséquences sur l'atmosphère. Ces études variées se fondent sur des données d'observation au sol et par avion de la formation d'aérosols atmosphériques, sur le cas de perturbations rapides du rayonnement cosmique galactique lors des effets Forbush liés aux éjections de masse coronale du Soleil et enfin sur les premières simulations numériques intégrant la formation des noyaux de condensation par le rayonnement cosmique.

Ces travaux récents, différents et complémentaires dans leurs approches, conduisent pour l'instant à la conclusion que les rayons cosmiques n'ont pas d'influence majeure sur le climat actuel.

Bien évidemment, de nombreuses incertitudes subsistent encore et ces travaux devront être reproduits et vérifiés. Il faut aussi attendre les conclusions de l'approche expérimentale conduite au CERN, même si les résultats préliminaires soulignent les difficultés de l'expérience CLOUD. Par ailleurs, d'autres hypothèses d'interaction entre les particules ionisantes et l'atmosphère ont été envisagées et devront faire l'objet d'observations directes et de modélisation numérique. De même, les observations et modélisations en astrophysique solaire devraient nous en apprendre beaucoup plus sur les modes de variation du Soleil aux différentes échelles de temps. Tous ces mécanismes méritent des études complémentaires ; l'importance de leur rôle reste à établir sur des bases scientifiques convaincantes.