



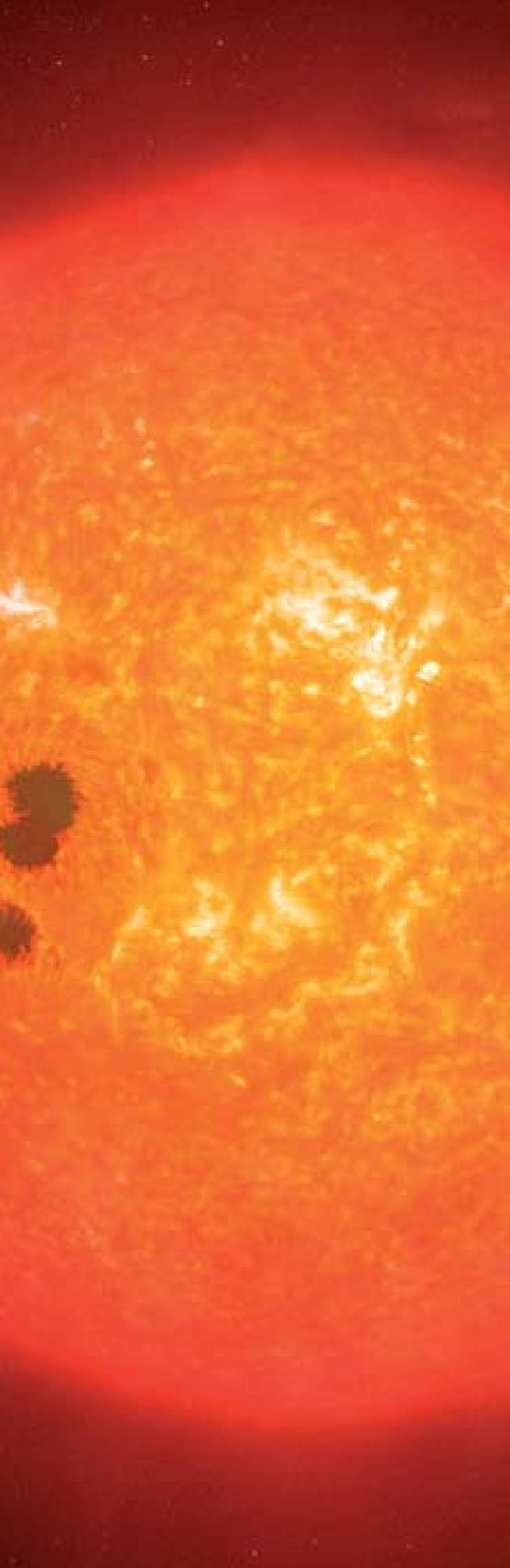
Les conditions hospitalières que nous connaissons sur Terre dépendent d'une combinaison fortuite de plusieurs paramètres qui conditionnent l'état physique de l'eau sur notre planète: la distance Terre-Soleil, le rôle stabilisateur de la Lune et la composition chimique de l'atmosphère terrestre. En plus de cette dernière, le système climatique comprend d'autres compartiments très divers comme l'océan, les glaces marines et continentales, la biosphère et les sols. Ces compartiments échangent entre eux de l'énergie et de l'eau, sous forme solide, liquide ou gazeuse.

INFLUENCE DU SOLEIL SUR LE CLIMAT

ÉDOUARD BARD*

*Professeur au Collège de France,
Membre de l'Académie des sciences*

* Directeur adjoint du CEREGE à Aix-en-Provence (UMR CNRS, Aix-Marseille Université, IRD, Collège de France). Il vient de diriger un ouvrage collectif de synthèse, publié en 2011 aux éditions Le Pommier : L'Océan, le climat et nous, un équilibre fragile ?



© Eso Calçada

LE CLIMAT, UN SYSTÈME D'UNE GRANDE COMPLEXITÉ

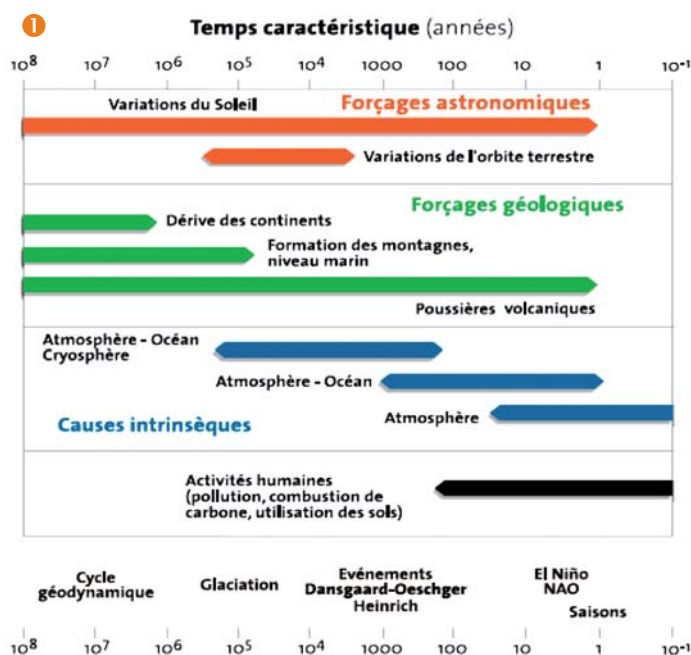
La complexité du système climatique vient du fait que tous ses compartiments sont en perpétuelle évolution. L'atmosphère, en particulier, est animée de mouvements rapides et incessants qui sont l'objet d'étude du météorologue. **Les échanges d'énergie et de matière sont déstabilisés en permanence par de nombreux forçages** (1), notamment des variations cycliques (alternances diurne et saisonnière, cycles astronomiques de l'insolation...) ou des phénomènes irréguliers comme les éruptions volcaniques.

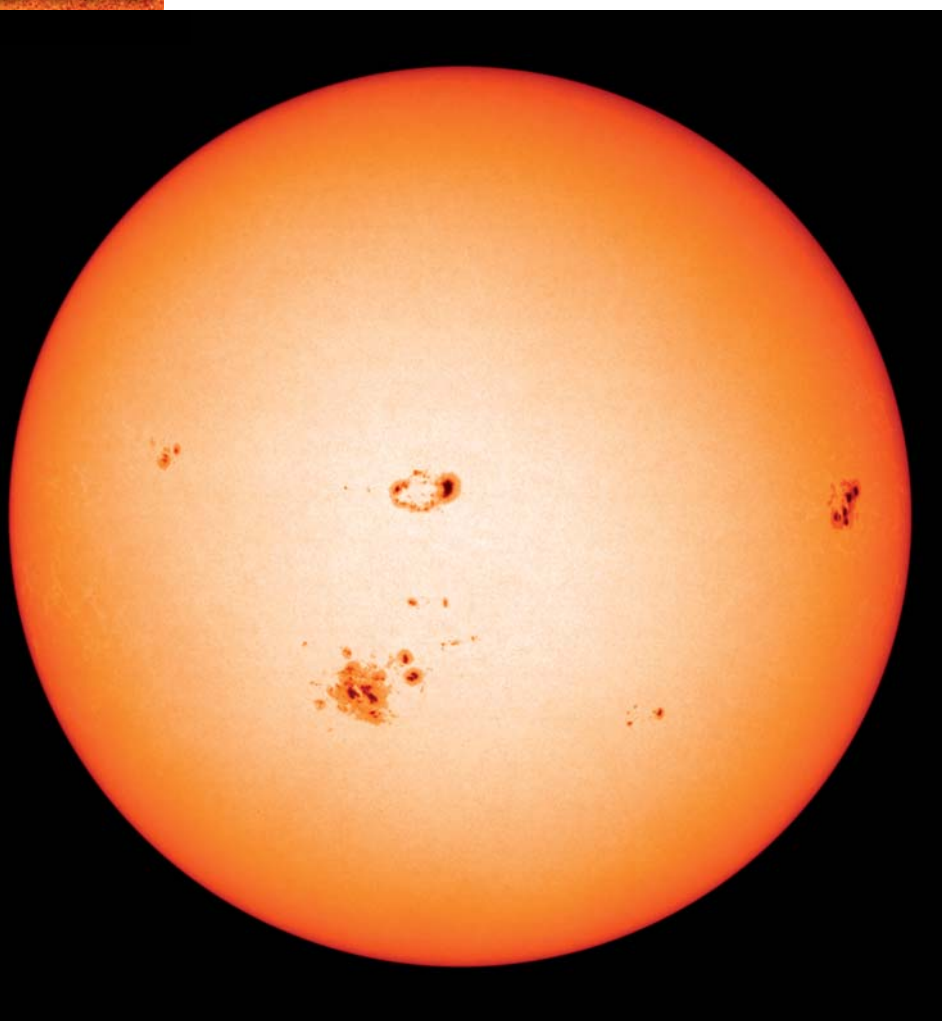
Ces changements, d'amplitudes variées, influent sur les transports de chaleur à toutes les échelles spatiales. Cela est particulièrement vrai pour le cycle saisonnier aux hautes latitudes : une surface de 1 mètre carré reçoit environ 200 watts au niveau du cercle polaire, mais cette insolation moyenne masque de larges fluctuations saisonnières entre un maximum de plus de 500 watts lors du solstice d'été et un minimum nul lors du solstice d'hiver (nuit permanente).

Les masses d'air de l'atmosphère réagissent typiquement sur des temps de l'ordre de la semaine, mais l'atmosphère est couplée à d'autres composantes du système climatique qui ont des temps caractéristiques très variables. L'océan évolue sur des échelles beaucoup plus longues allant de l'année pour l'océan de surface à plusieurs siècles pour l'océan profond. Les calottes de glace continentales interviennent sur des échelles de temps généralement supérieures au millier d'années, même si des épisodes de débâcles glaciaires peuvent être limités à quelques siècles, voire quelques décennies.

Le système climatique est aussi couplé à d'autres cycles planétaires tel celui de l'eau ou les cycles biogéochimiques d'éléments comme le carbone ou l'azote. Ainsi, les variations de la biosphère, allant de la saison au millénaire, ont une influence sur les teneurs en eau et en gaz carbonique de l'atmosphère. À leur tour, ces changements affectent le bilan radiatif de l'atmosphère et perturbent le système climatique dans son ensemble.

Pour avoir une perspective générale des perturbations du système climatique, il est utile de tracer un diagramme représentant les différents forçages externes d'origine astronomique ou géologique ainsi que les variations intrinsèques (figure 1). Ces phénomènes ont des impacts climatiques très variés pour ce qui concerne leurs amplitudes et leurs échelles spatiales. Par ailleurs, ces forçages interviennent sur des échelles de temps très différentes, de l'année au milliard d'années, se superposent et se combinent les uns avec les autres, ce qui en complique l'étude par les climatologues.





© Solar and heliographic observatory/Nasa

niques (3). Depuis 20 ans, de nombreux auteurs ont montré que le nombre des taches solaires et d'autres de leurs caractéristiques peuvent être utilisés pour reconstituer l'irradiance solaire au cours des 3 à 4 derniers siècles [2]. Mais il est aussi possible de reconstituer l'activité solaire en étudiant l'abondance sur Terre des cosmonucléides [3],[4]. Ces isotopes sont formés par interaction du rayonnement cosmique galactique avec les molécules de l'atmosphère. Les protons du rayonnement cosmique primaire étant des particules chargées, **la production de cosmonucléides est fortement modulée par les intensités des champs magnétiques du Soleil et de la Terre** (voir encadré 1). Ainsi, l'activité solaire, par l'intermédiaire du champ magnétique solaire, intervient dans la production des cosmonucléides. Les géochimistes mesurent l'abondance de ces isotopes dans des archives naturelles comme les glaces polaires (pour le ^{10}Be et ^{36}Cl), les anneaux d'arbre et les coraux (pour le ^{14}C). 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 plus faible et donc une irradiance plus faible également.

QUELLES CORRÉLATIONS ENTRE L'ACTIVITÉ SOLAIRE ET LES SÉRIES CLIMATIQUES ?

● UN LIEN SOLEIL-CLIMAT QUI, PARFOIS, SEMBLE SIMPLE...

La première recherche d'une correspondance systématique entre l'activité solaire et le climat date de plus de deux siècles avec, notamment, les travaux de l'astronome anglais William Herschel (1801). D'innombrables travaux ont été publiés depuis sur ce sujet qui reste l'objet de vives controverses pour plusieurs raisons majeures. En effet, 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

L'IRRADIANCE SOLAIRE, UNE GRANDEUR VARIABLE

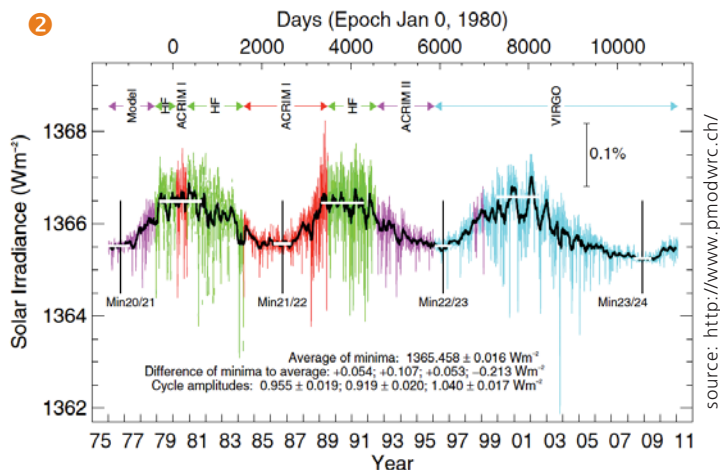
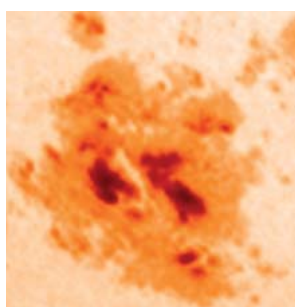
● L'APPORT DES MESURES SATELLITAIRES

Il a fallu attendre la fin des années 70 pour obtenir les premières données précises sur l'irradiance solaire (2) 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 11 ans se superpose à une ligne de base évoluant faiblement, probablement à la baisse (figure 2). Les données des satellites montrent aussi que les variations d'irradiance solaire ne sont pas homogènes sur tout le spectre [1], avec notamment une plus forte amplitude relative pour les rayons ultraviolets (avec des conséquences importantes sur le chauffage de la stratosphère et sur la formation de l'ozone stratosphérique par des réactions photochimiques).

● MESURES INDIRECTES DE L'IRRADIANCE SOLAIRE

Pour remonter au-delà des premières mesures par les satellites, il faut étudier d'autres données sur l'activité solaire comme les observations des taches solaires, de la variabilité géomagnétique et des nucléides cosmogé-



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 [2]. Un exemple classique est l'influence du cycle de 11 ans sur les températures et les vents de la stratosphère [5]. 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 leur altitude [6]. Néanmoins, les correspondances annoncées n'ont pas été confirmées par des études plus récentes.

L'étude empirique d'un lien Soleil-climat a aussi été conduite pour des échelles de temps encore plus longues, notamment sous l'impulsion de Jack Eddy [7], qui fut le premier dès 1976 à suggérer de façon convaincante un

lien causal entre les « grands minima » d'activité solaire et la période du petit âge glaciaire (voir encadré 2). 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 ^{10}Be et ^{14}C .

● ... MAIS QUI SE RÉVÈLE D'UNE GRANDE COMPLEXITÉ

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 (forçages externes ou oscillations internes au système climatique). Par ailleurs, les

enregistrements paléoclimatiques présentent une hétérogénéité spatiale suggérant l'importance de processus régionaux [2]. On doit souligner que les termes évocateurs de petit âge glaciaire et d'optimum médiéval (voir encadré 2) schématisent des réalités qui sont en fait 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 comme par exemple la variabilité ENSO (El-Niño Southern Oscillation). Ces analyses sont conduites à partir des enregistrements de la température moyenne à l'échelle mondiale ou sur

Le réchauffement actuel ne peut probablement pas être expliqué par le forçage solaire. Cela suggère l'influence probable d'autres forçages, notamment celui des gaz à effet de serre dont les concentrations ont augmenté continûment.

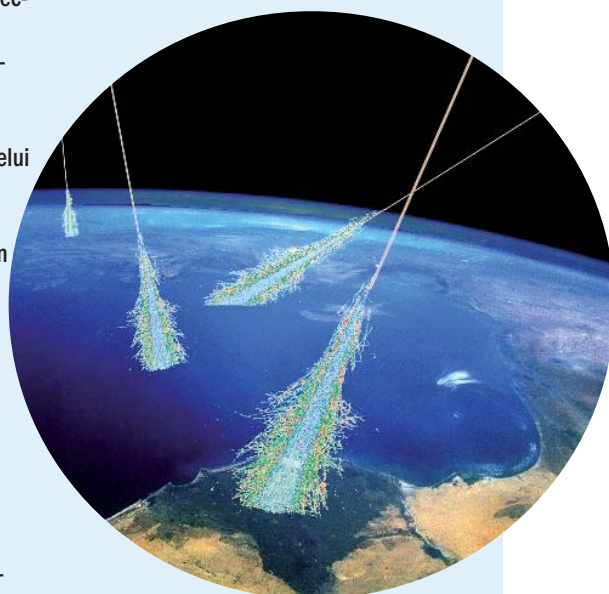
1. RAYONS COSMIQUES, VENT SOLAIRE ET COSMONUCLÉIDES

Les **rayons cosmiques** sont des particules élémentaires (protons, électrons) et des noyaux d'atomes se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière et provenant de toutes les directions du ciel. On parle de rayonnement cosmique galactique. Lorsqu'ils pénètrent dans notre atmosphère, les corpuscules très énergétiques des rayons cosmiques entrent en collision avec les atomes qu'ils rencontrent et les brisent, formant alors des isotopes appelés **cosmonucléides**.

Le **vent solaire** est un flux de matière ionisée de faible densité provenant des couches externes de l'atmosphère solaire et qui se déplace rapidement dans l'espace, avec des vitesses de 400 à 800 km/s (lire article p. 21). Le vent solaire transporte avec lui son propre champ magnétique. Plus le Soleil est actif, plus le magnétisme du vent solaire est important.

Les particules chargées des rayons cosmiques sont déviées de leur trajectoire lorsqu'elles rencontrent un champ magnétique. Les rayons cosmiques sont donc partiellement déviés (canalisés) par le champ magnétique terrestre et aussi par celui du vent solaire. En conséquence, la quantité de rayons cosmiques qui traversent l'atmosphère est fonction de l'activité solaire. Plus le Soleil est actif, moins de rayonnement cosmique nous parvient et, donc, moins de cosmonucléides sont formés, et inversement.

Cet effet de diminution du flux de rayonnement cosmique traversant l'atmosphère terrestre lors des grandes éruptions solaires (de type CME) avait été observé par le physicien Forbush dès 1937, d'où le nom donné à ce phénomène : l'effet Forbush.



● **En interférant avec l'atmosphère, le rayonnement cosmique primaire, très énergétique, crée des gerbes de particules d'énergie bien inférieure.**

2. LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, EN EUROPE, À L'ÉPOQUE HISTORIQUE

Des variations du climat ont été observées et relatées dans notre histoire européenne. Avant qu'il existe des relevés de température donnant des éléments chiffrés, ce sont les documents signalant les famines, les disettes, mais aussi les bonnes années pour les céréales et le vin, qui apportent des informations précieuses. L'étude de l'évolution des glaciers alpins est aussi très utile.

Les trois ouvrages monumentaux d'Emmanuel Le Roy Ladurie de la série *Histoire humaine et comparée du climat* montrent, si l'on est tenté de l'oublier, combien le climat joue sur la vie humaine et les sociétés un rôle sans doute aussi important que les guerres et les bouleversements géopolitiques.

Les périodes mérovingienne et carolingienne (V^e au X^e siècle) semblent avoir connu un climat très froid, mais, après l'an mille, les conditions s'améliorent durant trois siècles. Le haut Moyen Âge est marqué par des conditions climatiques favorables à l'accroissement de la population qui s'installe sur de nouveaux espaces et aussi au développement du commerce et des échanges. C'est ce qu'on a appelé le **petit optimum médiéval**. Mais, au début du XIV^e siècle le froid revient et s'installe globalement pour plusieurs siècles. E. Le Roy Ladurie choisit de faire durer ce qu'il est convenu d'appeler le **petit âge glaciaire** (PAG) jusqu'au milieu du XIX^e. Cette période est caractérisée dans toute l'Europe occidentale par des hivers plus froids et des étés plus frais que ceux qui prévalent aujourd'hui, la différence étant de l'ordre d'environ 0,5 °C

seulement. Ces phénomènes sont particulièrement nets à l'époque de Louis XIV et correspondent à ce que les physiciens solaires appellent le **minimum de Maunder** (1645-1715), caractérisé par un déficit prolongé en taches solaires. Cependant il ne faut pas perdre de vue la notion de variabilité climatique : les cinq ou six siècles du petit âge glaciaire ne sont pas uniformément froids et il y eut un certain nombre d'hivers doux et d'étés brûlants. Il y eut aussi, en plein PAG, la première moitié du XVI^e siècle qui fut en général agréable, avec des étés chauds, et même caniculaires, favorables aux moissons et aux vendanges précoces. En France, cette période correspond en partie à la Renaissance. On peut signaler la construction à cette époque de nombreux châteaux au bord des rivières pour y trouver la fraîcheur.

Les glaciers alpins ont considérablement évolué au cours du dernier millénaire. Leurs avancées et reculs témoignent des refroidissements et des réchauffements moyens du climat mais aussi de la pluviométrie. Des documents historiques viennent corroborer les études géologiques : certains cols, praticables au Moyen-Âge, ne sont en effet plus accessibles en raison d'un englacement pendant le PAG. Des constructions ont même été détruites par la progression des glaciers.

On pourra consulter l'ouvrage d'Élisabeth Nesme-Ribes et Gérard Thuillier, *Histoire solaire et climatique*, paru en 2000 (éd. Belin).

les données régionales pour la période récente mieux documentée [2]. Les différentes composantes climatiques sont identifiées en étudiant leurs répartitions géographiques et verticales qui constituent des signatures caractéristiques :

- amplification stratosphérique pour une variation solaire ;
- réchauffement stratosphérique et refroidissement troposphérique lors d'une éruption volcanique ;
- refroidissement stratosphérique et réchauffement troposphérique pour une

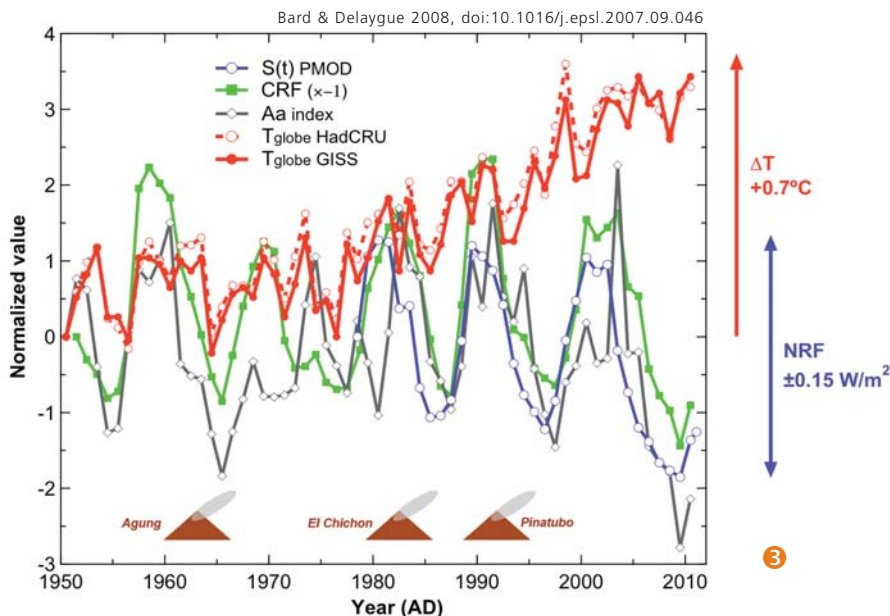
augmentation de gaz à effet de serre ;
- signatures géographiques d'El Niño au niveau de l'océan Pacifique et des continents adjacents.

À l'échelle globale, l'amplitude thermique du cycle de 11 ans est estimée à environ 0,1 °C [1] avec des extrêmes allant de 0,06 à 0,18 °C selon les auteurs. 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 proba-**

blement pas être expliqué par le forçage solaire (figure 3, les anomalies-moyennes de la température de surface sont en rouge). 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). **Cela 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.

DES MODÈLES POUR LES MÉCANISMES DU FORÇAGE SOLAIRE

L'approche empirique a évidemment ses limites car certains forçages sont encore mal quantifiés (c'est le cas de la composante ultraviolette du spectre solaire) ou restent encore à l'état d'hypothèse (par exemple 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 (El Niño Southern Oscillation) et NAO (North Atlantique Oscillation).



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 élevé tout en permettant des simulations longues de plusieurs siècles. L'utilisation des modèles de circulation générale permet d'étudier finement les rétroactions climatiques (4)

qui amplifient ou atténuent le signal radiatif lié à un forçage particulier ainsi que d'envisager la combinaison multiple des forçages. On peut citer l'exemple de l'éruption majeure en 1815 du volcan Tambora (Indonésie) ayant contribué à la célèbre « année sans été » de 1816 qui a eu lieu en plein minimum prolongé de l'activité solaire.

L'influence des variations de l'irradiance solaire totale est l'objet d'une abondante littérature depuis les années 70. 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 [2].

LE RÔLE DES NUAGES ET L'IMPACT DES RAYONS COSMIQUES

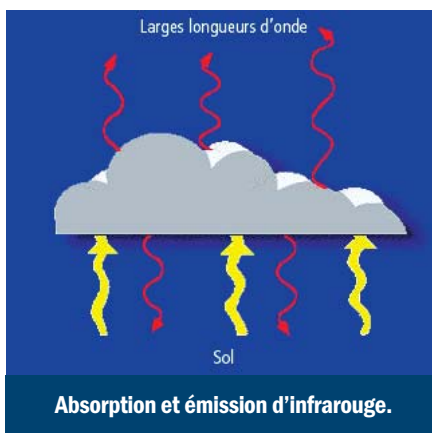
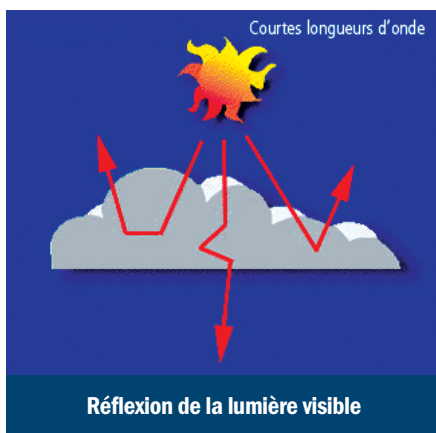
En plus de ces effets directs, une hypothèse déjà ancienne a été relancée en comparant la nébulosité et le flux de rayons cosmiques. On peut faire le parallèle (simpliste) avec le principe de la « chambre à brouillard » détecteur de physique dans lequel les particules ionisantes se comportent comme des 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 [8]. Des 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, **les 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** (figure ci-contre).

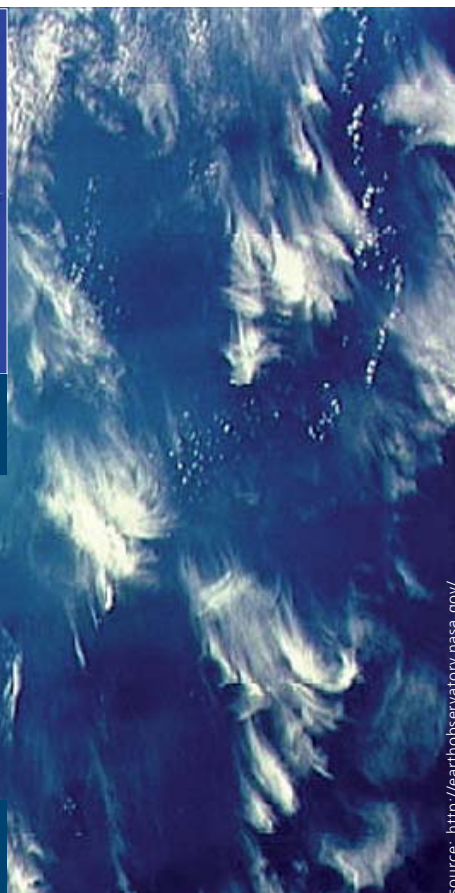
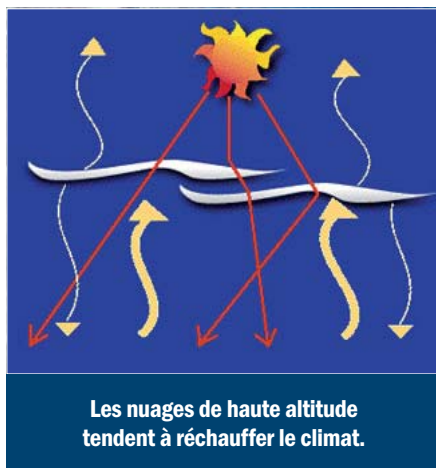
L'hypothèse de l'équipe danoise était donc incompatible avec l'apparente corrélation entre l'activité solaire et le réchauffement durant le XX^e siècle. Les chercheurs danois ont ensuite modifié leur analyse en proposant une influence solaire limitée aux nuages de basse altitude dont la couverture semblait 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 [2]. 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 (5) liés aux éjections de masse coronale du Soleil; elles prennent également en compte les premières simulations numériques intégrant la formation des noyaux de condensation par le rayonnement cosmique. Ces travaux récents, différents et complémen-

L'INFLUENCE DES NUAGES SUR LE BILAN RADIATIF TERRESTRE.



Ces 2 effets se compensent mais globalement les nuages refroidissent le climat.



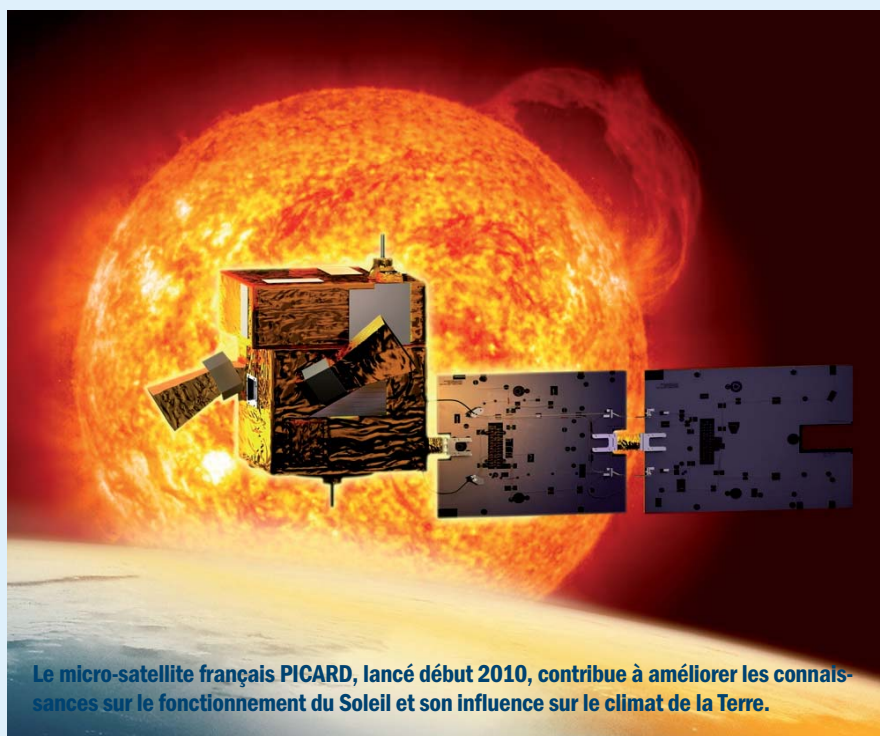
source: <http://earthobservatory.nasa.gov/>

taires 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 avec l'expérience CLOUD (6) même si les résultats préliminaires en soulignent les difficultés. 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. ■

1. Forçage: ce terme désigne l'implication d'une cause extérieure à un système qui influe sur l'évolution de ce système de façon notable.
2. Irradiance solaire: c'est l'énergie, provenant de l'émission radiative du Soleil, qui est reçue par une surface de 1m^2 , à la distance de 1 unité astronomique du Soleil, hors atmosphère et placée perpendiculairement au rayonnement incident. Jusqu'au XIX^e siècle, l'irradiance solaire a été supposée constante, ce qui lui a valu le nom de « constante solaire ». Actuellement, la valeur moyenne généralement retenue est de 1366Wm^{-2} .
3. Nucléides cosmogéniques ou cosmonucléides: ce sont des isotopes produits *in situ* par le rayonnement cosmique. Exemples; ^{10}Be , ^{26}Al ou ^{14}C .
4. Une rétroaction peut avoir un effet modérateur lorsque le système tend à s'opposer à la perturbation initiale, mais elle peut aussi avoir un effet amplificateur conduisant alors à une déstabilisation du système.
5. Le physicien Scott Forbush a découvert, en 1937, que les grosses éruptions solaires atténuent le flux des rayons cosmiques traversant l'atmosphère.
6. L'expérience CLOUD (Cosmics Leaving OUtdoor Droplets) au CERN exploite une chambre à brouillard pour étudier un lien possible entre les rayons cosmiques et la formation des nuages.

LA MODÉLISATION CLIMATIQUE, un outil essentiel pour comprendre le passé et prévoir le futur

La modélisation climatique permet aussi d'exploiter pleinement les reconstitutions paléoclimatiques concernant des climats du passé différents de l'actuel (par exemple les phases climatiques communément appelées le petit âge glaciaire, l'optimum médiéval, l'optimum holocène...). Les enregistrements des forçages [9] servent à perturber les modèles dont les simulations peuvent ensuite être comparées de façon indépendante aux reconstitutions des paramètres climatiques comme cela a été fait, par exemple pour le dernier millénaire. Signalons les travaux récents de comparaisons modèles-données d'équipes françaises [10], [11] et le dernier rapport du GIEC [12]. De telles comparaisons modèles-données ont permis de progresser dans la compréhension de la machine complexe du climat de la Terre et ont poussé les spécialistes de la modélisation à améliorer leurs calculs numériques. Ceux-ci prennent en compte de nombreux processus physico-chimiques dans des architectures de plus en plus complexes pour tenter de reproduire explicitement le véritable système climatique avec ses couplages entre compartiments et ses aspects physiques, chimiques et biologiques. ■



Le micro-satellite français PICARD, lancé début 2010, contribue à améliorer les connaissances sur le fonctionnement du Soleil et son influence sur le climat de la Terre.

© Cnes/Durios

[1] LEAN, J.L., Cycles and trends in solar irradiance and climate. *WIREs Clim. Change*, 1, 111–122, doi:10.1002/wcc.018, (2010).

[2] GRAY, L. J., BEER, J., GELLER, M., HAIGH, J.D., LOCKWOOD, M., MATTHES, K., CUBASCH, U., FLEITMANN, D., HARRISON, G., HOOD, L., LUTERBACHER, J., MEEHL, G.A., SHINDELL, D., VAN GEEL, B., AND WHITE, W., Solar influences on climate. *Rev. Geophys.*, doi:10.1029/2009RG000282, (2010).

[3] BARD, E., AND FRANK, M., Climate change and solar variability: what's new under the Sun. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 248, 1-14, (2006).

[4] DELAYGUE, G. AND BARD, E., An Antarctic view of Beryllium-10 and solar activity for the past millennium, *Clim. Dyn.*, 36, 2201-2218, DOI:10.1007/s00382-010-0795-1, (2011).

[5] LABITZKE, K., J. AUSTIN, N. BUTCHART, J. KNIGHT, M. TAKAHASHI, M. NAKAMOTO, T. NAGASHIMA, J. HAIGH, AND V. WILLIAMS, The global signal of the 11-year solar cycle in the stratosphere: Observations and model results, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 64, 203-210, (2002).

[6] MARSH, N.-D., SVENSMARK, H., Low cloud properties influenced by cosmic rays. *Phys. Rev. Lett.*, 85 (23), 5004-5007, (2000).

[7] EDDY, J.A., The Maunder Minimum. *Science*, 192, 1189-1201, (1976).

[8] SVENSMARK, H. and E. FRIIS-CHRISTENSEN., Variations of cosmic ray flux and global cloud coverage - A missing link in solar-climate relationships, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 59, 1225-1232, (1997).

[9] SCHMIDT G.A., JUNGCLAUS J.H., AMMANN C.M., BARD E., BRACONNOT P., CROWLEY T.J., DELAYGUE G., JOOS F., KRIVOVA N.A., MUSCHELER R., OTTO-BLIESNER B.L., PONGRATZ J., SHINDELL D.T., SOLANKI S.K., STEINHILBER F., VIEIRA L.E.A. Climate forcing reconstructions for use in PMIP simulations of the Last Millennium (v1.0). *Geoscientific Model Development* 4, 33-45, doi: 10.5194/gmd-4-33-2011, (2011).

[10] SWINGEDOUW D., TERRAY L., CASSOU C., VOLDOIRE A., SALAS-MELIA D., SERVONNAT J. Natural forcing of climate during the last millennium: Fingerprint of solar variability, *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-010-0803-5, (2010).

[11] SERVONNAT J., P. YIOU, M. KHODRI, D. SWINGEDOUW, S. DENVIL, Influence of solar variability, CO₂ and orbital forcing between 1000 and 1850 AD in the IPSLCM4 model. *Climate of the Past* 6, 445-460, doi: 10.5194/cp-6-445-2010, (2010).

[12] http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/figure-6-14.html