

# Soleil et climat: Ça discute sur la banquise

Grâce à la paléoclimatologie, nous savons maintenant que le climat du passé, loin d'être stable, présentait de fortes fluctuations. Pendant plus de 10 000 ans, l'activité du soleil, le volcanisme et les phénomènes internes au système ont constitué les principaux facteurs naturels influant sur le climat. Depuis la révolution industrielle, cependant, un autre facteur de poids est venu se surimposer: l'homme. Les activités anthropiques constituent depuis une vingtaine d'années le facteur prépondérant du réchauffement climatique. Pour pouvoir comprendre le système complexe qui régit le climat et se faire une idée de l'emprise de l'homme sur ce système, il est tout d'abord nécessaire de bien étudier les facteurs climatiques naturels. C'est dans cet esprit que l'EAWAG s'est penché sur les fluctuations de l'activité du soleil dans le passé.

Le soleil représente de loin la source d'énergie la plus importante de la Terre et constitue donc le moteur de notre système climatique. Il stimule la circulation atmosphérique à la fois directement par le biais

de son rayonnement et indirectement en influençant la composition de l'atmosphère (ozone, vapeur d'eau, etc.).

L'apport d'énergie par le soleil a longtemps été considéré comme constant, étant dé-

signé par les climatologues sous le terme de «constante solaire». Il s'élève à environ  $1366 \text{ W/m}^2$  et correspond à l'intensité du rayonnement solaire (=irradiance) qui atteint la limite supérieure de l'atmosphère à une distance de 1 unité astronomique du soleil (distance moyenne entre le soleil et la Terre). La mesure directe de l'irradiance solaire par satellite n'est possible que depuis 1978. Et on observe depuis que la constante solaire n'est en réalité pas constante du tout. Bien plus, elle fluctue selon un cycle d'environ 11 ans (Fig. 1A) avec une amplitude moyenne de 0,1% [1]. Ceci montre bien que le moteur de notre système climatique n'est pas régulier, mais qu'il fonctionne tantôt à haut régime, tantôt à bas régime. Les variations de l'irradiance sont liées aux fluctuations de l'activité du soleil. Mais qu'en était-il avant 1978, avant que nous ne disposions de mesures directes? En association avec d'autres équipes de recherche internationales, l'EAWAG s'est mis à la recherche d'indices permettant de retracer l'activité du soleil jusque dans un lointain passé [2, 3].

## Les taches solaires trahissent l'activité du soleil

Les astronomes ont commencé à accumuler des indices sur la variabilité de l'activité solaire il y a environ 400 ans. Depuis l'invention de la lunette astronomique en 1610, la surface du soleil est constamment observée et ses modifications consciencieusement notées [4]. On s'est ainsi aperçu que le nombre de taches sombres à la surface du soleil variait fortement, pouvant aller de 0 à plus de 300. Tout comme l'irradiance, le nombre de taches solaires fluctue avec un rythme d'environ 11 ans (Fig. 1B + 2). Les taches solaires sont le reflet de processus magnétiques et sont donc les témoins directs de l'activité du soleil. Plus le soleil est actif, plus il présente de taches à sa surface. Si elles paraissent sombres, c'est que leur température superficielle (env. 4000 kelvins soit  $3700 \text{ }^\circ\text{C}$ ) est plus faible que la normale (env. 5800 kelvins ou  $5500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) et qu'elles émettent donc moins d'énergie.

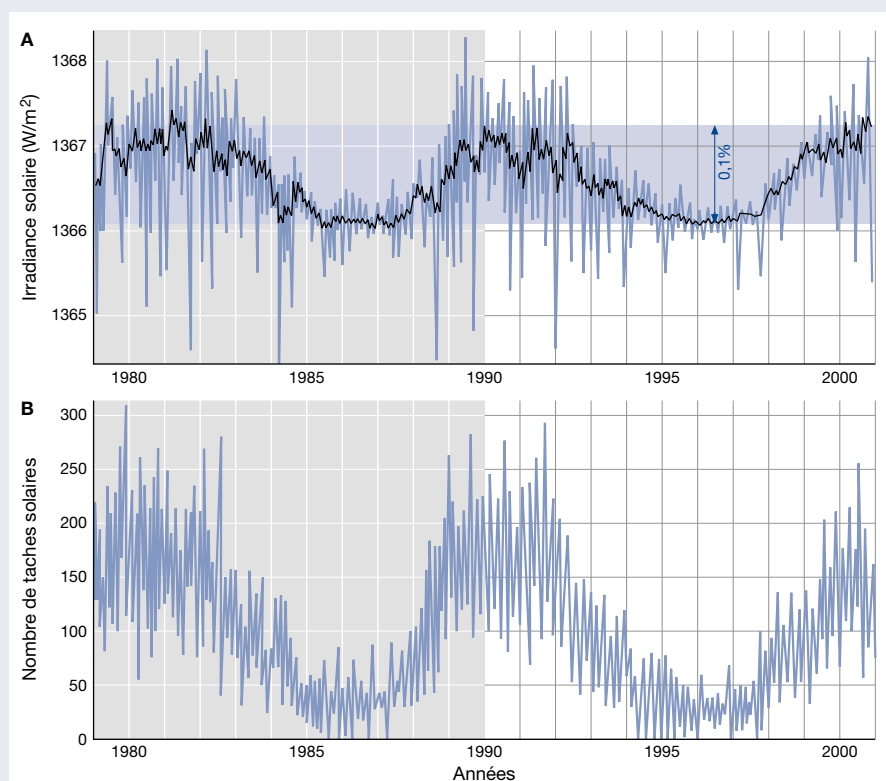


Fig. 1: Mesures d'irradiance solaire effectuées par satellite depuis 1978 (A) [1] et comparées au nombre de taches solaires observées pendant la même période (B) [4].

Mais comme les zones qui entourent les taches solaires sont, elles, beaucoup plus chaudes que la normale, l'énergie globalement émise par le soleil est plus importante quand ces taches sont nombreuses.

Cette relation se trouve confirmée par les mesures d'irradiance solaire effectuées par les satellites: les deux courbes évoluent en parallèle (Fig. 1A + B). Forts de cette constatation, de nombreux scientifiques ont alors tenté de retracer l'évolution de l'irradiance à partir du nombre de taches solaires observées et par là même d'expliquer certaines variations du climat au cours des 400 dernières années.

## De fortes fluctuations de l'activité solaire au cours des 400 dernières années

Si on considère les observations des taches solaires consignées depuis bientôt quatre cents ans [4], on constate que l'activité du soleil s'est caractérisée par des fluctuations plus fortes et plus irrégulières que ne l'avaient suggéré les mesures satellitaires (Fig. 2). Ainsi, le minimum de Maunder entre 1645 et 1725 et celui de Dalton entre 1795 et 1830 ont été respectivement marqués par une absence quasi-totale et une présence très limitée de taches, ce qui indique une très faible activité du soleil. Depuis ce dernier minimum, le nombre de taches solaires ne cesse d'augmenter. Lean et ses collaborateurs ont étudié ce phénomène de plus près et tenté de quantifier l'intensité passée de l'éclairement solaire à partir du nombre de taches. D'après leurs calculs, l'irradiance solaire aurait augmenté de 0,24% depuis le minimum de Maunder [2] (Fig. 3). Il s'agit là d'une augmentation beaucoup plus forte que celle qui s'inscrit dans le cadre des

fluctuations mesurées jusqu'à présent. D'un autre côté, on sait à partir de l'étude d'autres systèmes solaires que l'irradiance peut présenter de très fortes variations. Ainsi, le rayonnement d'étoiles aux propriétés voisines de celles du soleil peut aller jusqu'à varier de 1%. Enfin, certains indices d'ordre climatique indiquent sur la Terre que de telles variations de l'irradiance sont loin d'être irréalistes. Ainsi par exemple, le «petit âge glaciaire» qui a touché l'Europe entre 1400 et 1850 et qui s'est traduit par une accumulation de matériaux morainiques en contrebas et à l'intérieur des Alpes sous l'effet de l'avancée des glaciers, coïncide avec une période d'activité réduite du soleil. On sait d'autre part de source historique que la Tamise était gelée tous les hivers pendant cette période. Pendant l'hiver 1683/1684, en plein minimum de Maunder, la couche de glace aurait été particulièrement épaisse. La Tamise n'a plus gelé depuis l'hiver 1813/1814 et depuis cette époque, les glaciers se retirent progressivement et les taches se multiplient à la surface du soleil.

## L'archivage de l'activité du soleil des derniers 11 500 ans dans les glaces polaires

Que faire, cependant, si l'on souhaite remonter plus loin que ces derniers 400 ans? C'est là qu'interviennent les recherches de l'EAWAG. Notre objectif est de retracer l'évolution de l'activité solaire pendant tout l'Holocène, c'est-à-dire pendant la période interglaciaire qui dure depuis environ 11 500 ans. Là encore, notre travail se base sur des indices indirects. Le témoin de l'activité du soleil que nous avons choisi de suivre est un radionucléide d'origine cosmogénique, le béryllium 10 ( $^{10}\text{Be}$ ). Cet isotope s'est formé

dans l'atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique et s'est accumulé dans les calottes glaciaires des pôles après avoir été entraîné par les précipitations (cf. article thématique, p. 3). Ces archives glaciaires très épaisses permettent de remonter très loin dans le temps sur des distances verticales relativement faibles. En effet, les différentes couches annuelles occupent une épaisseur très réduite du fait d'une part de la pression exercée par les couches plus jeunes sus-jacentes et d'autre part de l'écoulement de la glace. La carotte GRIP étudiée par l'EAWAG provient du Groenland, elle mesure environ 3 km de long et renferme plusieurs centaines de milliers d'années de glace. Dans un véritable travail de Sisyphe, les concentrations de  $^{10}\text{Be}$  ont tout d'abord été déterminées couche après couche dans la carotte (cf. Article de S. Bollhalder et I. Brunner, p. 6). En observant deux règles fondamentales, on peut évaluer l'activité du soleil à partir de la concentration en  $^{10}\text{Be}$ :

- La production de  $^{10}\text{Be}$  ne dépend pas uniquement de l'activité solaire mais également des fluctuations du champ magnétique terrestre. Si on veut étudier l'activité du soleil, il faut donc filtrer l'influence de ce champ magnétique.

- La concentration de  $^{10}\text{Be}$  mesurable dans la glace est influencée à la fois par la quantité de  $^{10}\text{Be}$  produite dans l'atmosphère et par la quantité de précipitations: Plus les précipitations sont importantes, plus le  $^{10}\text{Be}$  est dilué. L'activité solaire n'est donc pas directement déduite de la concentration en  $^{10}\text{Be}$  mais du flux de  $^{10}\text{Be}$  préalablement calculé: il s'agit du nombre d'atomes de  $^{10}\text{Be}$  déposés avec les précipitations dans un centimètre carré de glace en une seconde.

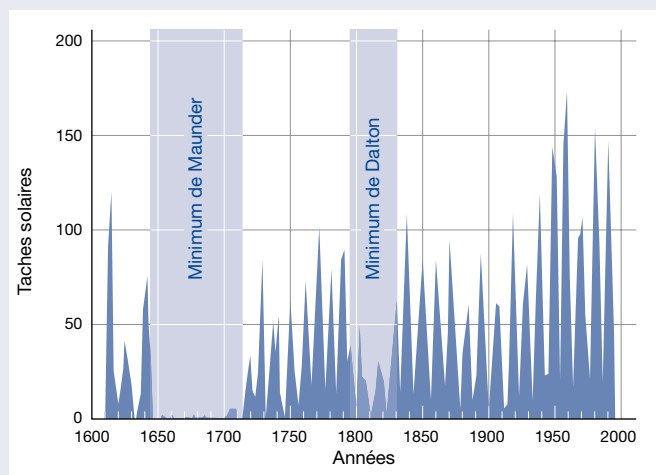


Fig. 2: Nombre de taches solaires observées depuis 1610 [4] représenté à partir des moyennes annuelles. Plus le soleil est actif, plus les taches formées à sa surface sont nombreuses. On observe en plus d'un cycle de 11 ans très net une tendance à l'augmentation de l'activité solaire depuis le début du XVIII<sup>e</sup> siècle.

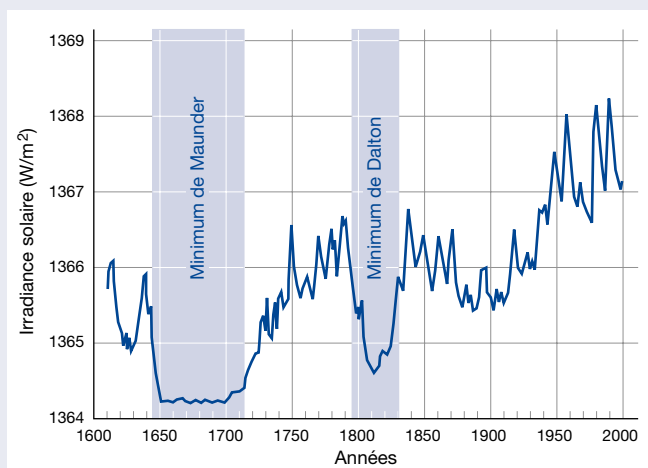


Fig. 3: Evolution de l'irradiance solaire retracée de 1610 à nos jours. La courbe a été obtenue à partir des protocoles d'observation des taches solaires et de l'étude d'étoiles similaires au soleil. D'après ces calculs, l'éclairement solaire a augmenté de 0,24% depuis le minimum de Maunder. D'après [2], modifié.

la granulométrie de ces couches est supérieure ou égale à celle de la fraction sableuse. D'où viennent ces matériaux?

Selon l'explication la plus plausible, ils auraient été transportés par des icebergs à la dérive. Lors d'une débâcle glaciaire (effondrement des bords de la calotte de glace), les icebergs formés emportent avec eux des débris arrachés au socle rocheux et maintenus par la glace sur leur face inférieure. Lorsque les icebergs fondent, ces débris sont libérés et se déposent sur les fonds océaniques. Ces matériaux détritiques grossiers amenés par les glaciers sont appelés «ice-rafted debris» (IRD) en référence à leur mode de transport.

### Une accumulation de débris rocheux rouges groenlandais dans les sédiments marins

Une étude détaillée de la composition des IRD contenus dans les carottes sédimentaires permet en grande partie d'en déterminer la provenance géographique. Ainsi, la présence de matériaux vitrifiés volcaniques trahit une origine islandaise. D'autres minéraux provenant nécessairement du Groenland ou de Terre-Neuve peuvent également servir de «traceurs pétrologiques». Ainsi, une composante rougeâtre dans les IRD indique la présence de débris arrachés aux «red beds», roches typiques de l'est du Groenland.

Le lieu de sédimentation de ces matériaux détritiques polaires révèle d'autre part que les icebergs pouvaient migrer très loin vers le sud au cours de l'Holocène. Ces longs déplacements n'étaient possibles que si les températures de l'eau et de l'air étaient très faibles et à même de retarder la fonte des icebergs. Ces niveaux sableux dans les sédiments marins sont donc des indicateurs

de périodes froides. Dans le cadre d'un projet international de recherche, la part d'IRD a été déterminée dans plusieurs carottes sédimentaires (Fig. 4, courbe blanche) [3] et les résultats ont été comparés avec ceux des flux de  $^{10}\text{Be}$  (Fig. 4, courbe bleu foncé). Les deux courbes présentent des similitudes. Une forte proportion d'IRD dans les sédiments indique une période de froid pendant laquelle les icebergs pouvaient se déplacer loin vers le sud. Pendant les périodes plus chaudes, la fonte des icebergs se produisait plus au Nord, ce qui se traduit par une faible part d'IRD dans les carottes sédimentaires étudiées.

Nos résultats indiquent les relations suivantes:

- Une «forte proportion d'IRD  $\approx$  période froide» est corrélée avec un «flux élevé de  $^{10}\text{Be} \approx$  faible activité solaire».
- Une «faible proportion d'IRD  $\approx$  période chaude» est liée à un «faible flux de  $^{10}\text{Be} \approx$  forte activité solaire».

Ces constatations indiquent que la dérive des icebergs pendant l'Holocène était vraisemblablement contrôlée par l'activité du soleil.

Toutes ces observations affirment bien le rôle dominant du soleil dans notre système climatique. Mais de nombreuses questions restent encore en suspens: Comment notre système climatique réagit-il aux variations de la quantité d'énergie rayonnée? Quels sont les processus responsables? De faibles variations de l'activité solaire se trouvent-elles amplifiées par des mécanismes internes au système climatique terrestre intervenant par exemple au niveau de l'atmosphère? La recherche actuelle cherche des réponses à ces questions et reste à l'affût de nouveaux indices.

Nos travaux ont montré une forte irrégularité du flux de  $^{10}\text{Be}$  et donc de l'activité du soleil tout au long de l'Holocène (Fig. 4, courbe bleu foncé). Les valeurs élevées du flux de  $^{10}\text{Be}$  correspondent à une faible activité solaire et inversement. Nous cherchons actuellement à exprimer cette indication assez grossière de l'activité solaire en termes d'irradiance solaire. Comme cela avait déjà été fait avec les taches solaires, nous tentons de suivre l'évolution de l'irradiance à travers les concentrations de  $^{10}\text{Be}$ .

### D'autres indices climatiques livrés par la dérive des icebergs

Des informations contenues dans d'autres archives paléoclimatiques viennent confirmer la thèse d'une influence très variable du rayonnement solaire pendant l'Holocène [3]. Diverses carottes sédimentaires prélevées dans les fonds marins de l'Atlantique Nord au large de l'Irlande à l'est et au large de Terre-Neuve à l'ouest se distinguent par la présence accusée de plusieurs couches de matériaux assez grossiers. Alors qu'à une si grande distance des côtes, les sédiments marins ne renferment en principe plus que des particules fines d'argiles et de limons,

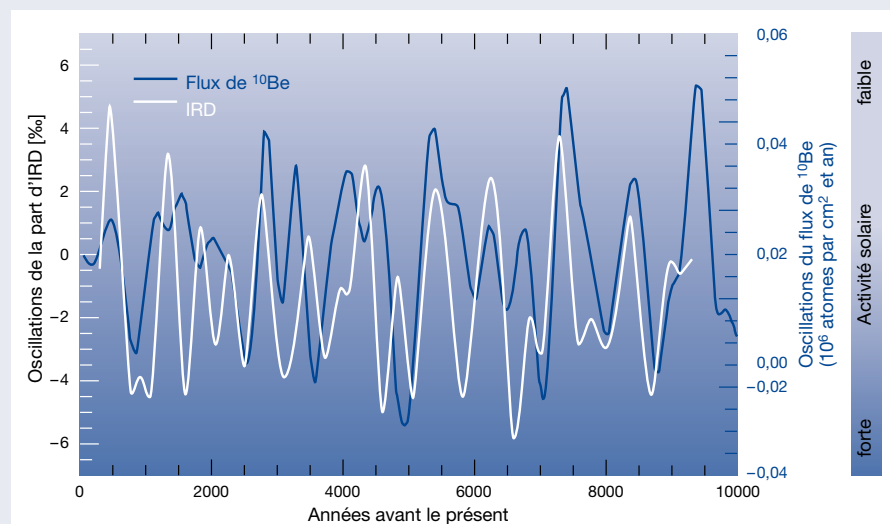
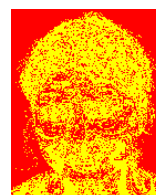


Fig. 4: Oscillations du flux de  $^{10}\text{Be}$  dans la carotte glaciaire GRIP (courbe bleu foncé) et de la part d'IRD dans les sédiments marins (courbe blanche). IRD = «ice rafted debris». D'après [3], simplifié.



Maura Vonmoos, spécialiste en géoscience, effectue actuellement un travail de thèse au département des «Eaux superficielles» de l'EAWAG dans lequel elle s'attache à retracer l'évolution de l'activité solaire au cours de l'Holocène.

- [1] Fröhlich C. (2000): Observations of irradiance variations. *Space Science Reviews* 94, 15–24.
- [2] Lean J., Beer J., Bradley R. (1995): Reconstruction of solar irradiance since 1610: implications for climate change. *Geophysical Research Letters* 22, 3195–3198.
- [3] Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M.N., Showers W., Hoffmann S., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G. (2001): Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene. *Science* 294, 2130–2136.
- [4] Hoyt D.V., Schatten K.H. (1998): Group sunspot numbers: a new solar activity reconstruction. *Solar Physics* 179, 189–219.