

# Rayonnement cosmique et nébulosité

**Les carottes de glace livrent une foule d'informations sur les variations environnementales du passé. Mais elles permettent aussi de traiter des questions bien spécifiques ou de tester des hypothèses bien précises. L'une de ces hypothèses stipule que les changements climatiques seraient principalement dus à des variations de l'intensité du rayonnement cosmique. Si tel était le cas, l'effet de serre ne jouerait qu'un rôle subalterne. Il s'agit donc d'une hypothèse pour le moins explosive sur le plan politique qu'il importe de vérifier avec soin.**

En 1997, des chercheurs danois se sont adressés à la presse, annonçant non sans fierté qu'ils avaient trouvé l'explication des changements climatiques des derniers 150 ans [1]. D'après eux, le rôle majeur ne serait joué ni par l'effet de serre ni par la constante solaire (voir l'article thématique, p. 3) mais par la nébulosité globale (voir encadré). Celle-ci serait influencée par le rayonnement cosmique et aurait considérablement diminué au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Ces travaux ont trouvé une résonance très importante dans les médias. Journaux, magazines et télévision consacrèrent coup sur coup articles et émissions à ce sujet et un livre intitulé «The Manic Sun» parut peu de temps après [2]. Etant donné que l'hypothèse danoise présente le réchauffement climatique comme un phénomène entièrement naturel

qui se produit sans aucune responsabilité de l'Homme, elle a été particulièrement bien accueillie dans les milieux économiques et politiques traditionnellement hostiles à toute mesure de réduction des gaz à effet de serre. Il était alors du devoir de la communauté scientifique d'intervenir et l'EAWAG a, comme beaucoup d'institutions, participé aux débats [3]. Ces discussions ont montré une fois de plus que les changements climatiques étaient de nature très complexe et s'expliquaient rarement par un phénomène unique. Parmi les principales causes avancées figurent en effet les gaz à effet de serre, l'irradiance solaire, les aérosols, les éruptions volcaniques et les fluctuations internes du système climatique. Dans les lignes qui suivent, nous aborderons surtout les deux premières causes citées.

## Gaz à effet de serre et rayonnement solaire

On observe depuis environ 1850 une augmentation quasiment continue de la température de l'air dans l'hémisphère Nord (Fig. 1) [4–6]. Parmi les facteurs soupçonnés d'intervenir, l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre dans l'atmosphère et la variation de l'activité solaire figurent en bonne place:

■ Si on considère par exemple l'évolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique, un gaz à effet de serre des plus importants, on constate effectivement depuis 150 ans une augmentation exponentielle de sa teneur qui s'accroît très rapidement depuis la moitié du XX<sup>e</sup> siècle (Fig. 1). La cause unanimement reconnue de cette évolution exponentielle est la consommation croissante de combustibles fossiles. La température a en revanche fortement varié pendant cette période. On distingue nettement deux périodes de réchauffement important, l'une de 1910 à 1940, l'autre de 1970 à aujourd'hui. La période de 1940 à 1970 a même été marquée par un léger refroidissement. Ces fluctuations correspondent mal à l'augmentation exponentielle des teneurs en CO<sub>2</sub>.

■ En ce qui concerne l'éclairement solaire, les mesures effectuées par les sondes spatiales depuis 1980 montrent d'un côté que l'intensité du rayonnement solaire n'est pas constant mais fluctue en suivant le cycle de 11 ans des taches solaires (voir Fig. 1, p. 8). D'un autre côté, une observation plus détaillée des mesures révèle que la variation de la constante solaire sur un cycle n'est que de 2 W/m<sup>2</sup> sur une moyenne de 1367 W/m<sup>2</sup>, soit 0,15%, ce qui est beaucoup trop faible pour expliquer les variations de température observées.

Ainsi, aucun des deux facteurs traditionnellement tenus pour responsables du réchauf-

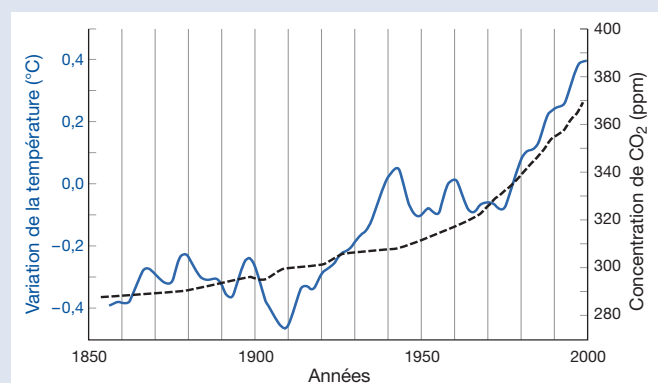


Fig. 1: Comparaison de la variation globale de la température depuis 1850 (rapportée à la période 1961–1990) avec les teneurs en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Courbe de température: moyenne d'une multitude de données provenant de diverses stations météo [4]. Courbe du CO<sub>2</sub>: avant 1953, données provenant de l'analyse de bulles d'air emprisonnées dans la glace de la carotte de Siple [5]; depuis 1958, mesures directes de CO<sub>2</sub> à Mauna Loa [6]. ppm = parts per million = parties par millions.

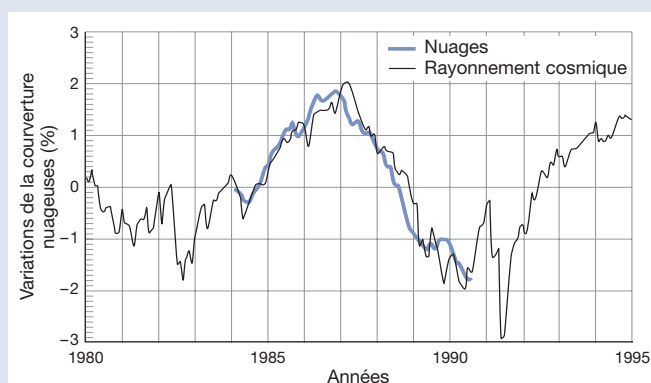


Fig. 2: La variation de la couverture nuageuse suit très bien l'évolution de rayonnement cosmique incident entre 1980 et 1995 et s'élève à plus de 2% [1]. La figure donne une représentation à la même échelle des moyennes glissantes sur 12 mois de la couverture nuageuse (exprimées en pourcentage de variation) et des moyennes mensuelles normalisées de mesures du rayonnement cosmique effectuées à Colorado (USA).

fement climatique ne peut expliquer à lui seul le phénomène. Tel est le constat actuel, unanimement accepté, également des Danois. Mais quels arguments développent-ils à partir de ce constat?

## Rayonnement cosmique et nuages

Les scientifiques danois se sont demandés si le rayonnement cosmique pouvait avoir une influence sur notre climat. D'après eux, plus le rayonnement cosmique qui pénètre dans l'atmosphère terrestre est important, plus la couverture nuageuse globale doit l'être aussi (voir encadré). Pour tenter de vérifier cette hypothèse, ces chercheurs ont étudié des images satellitaires de la couverture nuageuse de 1980 à 1995 et les ont comparées aux mesures d'intensité du rayonnement cosmique. Ils ont alors constaté que la nébulosité avait varié d'environ 2% pendant cette période, suivant exactement l'évolution du rayonnement cosmique (Fig. 2). L'hypothèse danoise semble donc capable d'expliquer les fluctuations climatiques observées par le passé. Mais l'étude des Danois repose tout de même sur une base instable étant donné qu'elle s'appuie sur une période d'observation très courte, d'à peine 15 ans. Pour pouvoir étayer cette hypothèse, il faudrait disposer de données supplémentaires sur le rayonnement cosmique et sur le climat des derniers siècles et millénaires. L'EAWAG a trouvé des informations à ce sujet dans les carottes de glace du Groenland.

## Un rayonnement cosmique affaibli ces 300 dernières années

Si on considère l'évolution des 300 dernières années, on constate une baisse globale du rayonnement cosmique pénétrant dans l'atmosphère. Cette information nous est fournie d'une part par les mesures directes de rayonnement cosmique incident effectuées depuis les années 1950 à l'aide de moniteurs à neutrons; d'autre part, des radionucléides emmagasinés dans la glace du Groenland, comme le béryllium 10 ( $^{10}\text{Be}$ )

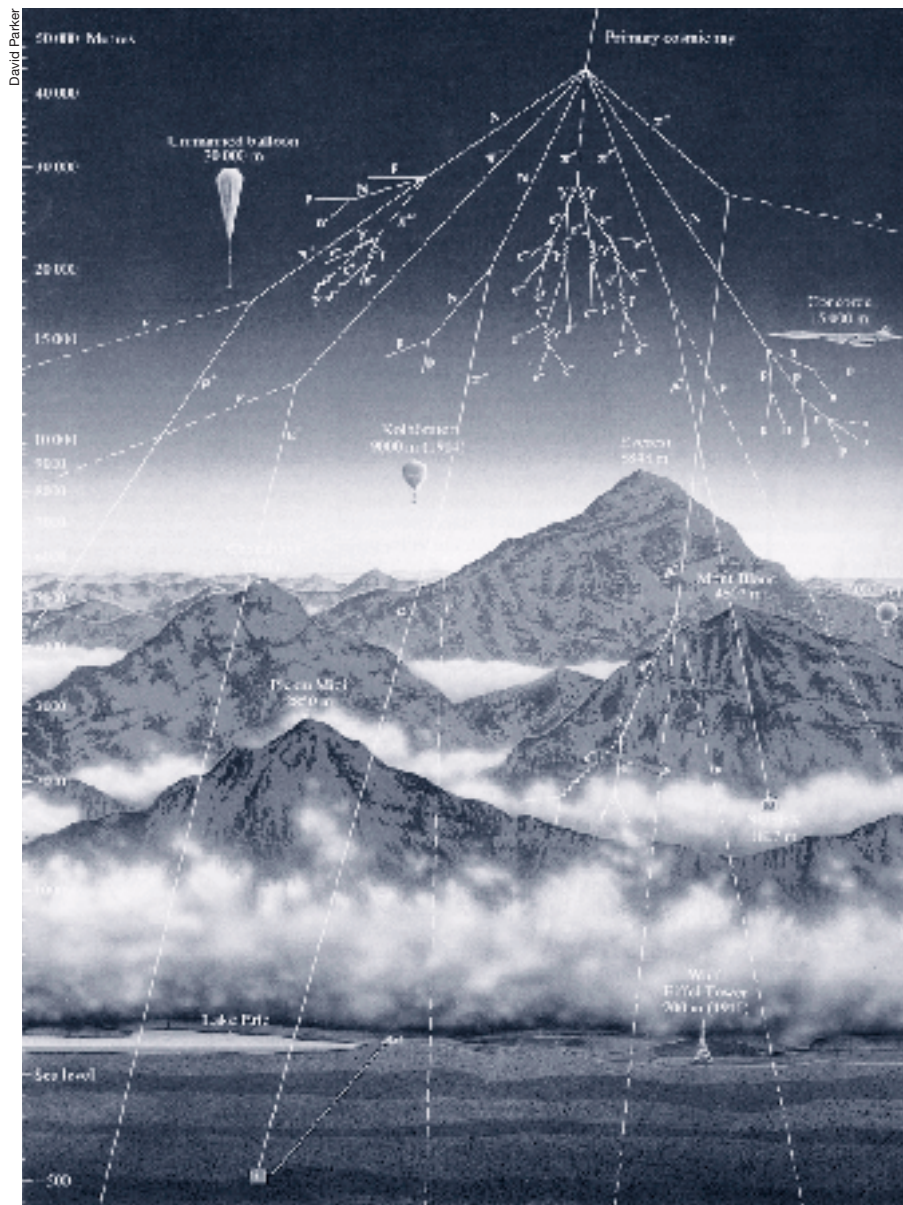


Fig. 3: Le rayonnement cosmique en provenance de l'espace pénètre avec une très forte énergie dans l'atmosphère et percute les atomes de l'air. Ces collisions provoquent la formation de particules secondaires qui viennent à leur tour heurter des atomes de l'air, les divisant en fragments, ce qui aboutit à la formation de radionucléides cosmogéniques. Dans le même temps, les particules primaires et secondaires du rayonnement cosmique provoquent une ionisation de l'air, ce qui, d'après l'hypothèse danoise, favoriserait la formation de nuages. La figure est un montage. Elle indique à quelle altitude les différents processus se déroulent dans l'atmosphère.

et le chlore 36 ( $^{36}\text{Cl}$ ) servent d'indicateurs indirects pour reconstituer le rayonnement cosmique du passé. Cet affaiblissement est probablement lié à une recrudescence de l'activité solaire (voir Fig. 2 et 3, p. 9). D'après l'hypothèse danoise, cette période

d'affaiblissement du rayonnement cosmique devrait être couplée à une baisse de la nébulosité et donc à un réchauffement du climat. Au vu des observations récentes, l'hypothèse danoise semble donc bien tenir la route.

## L'hypothèse danoise sur l'implication du rayonnement cosmique et de la nébulosité

L'hypothèse des scientifiques danois Svensmark et Friis-Christensen [1] semble simple et évidente: Le rayonnement cosmique – un flux de particules hautement énergétiques provenant du fin fond de l'espace – pénètre dans l'atmosphère où il provoque une ionisation de l'air (Fig. 3). Ces ions constituent alors des noyaux autour desquels la vapeur d'eau vient se condenser pour former des gouttelettes, ce qui conduit finalement à la formation de nuages. Plus les nuages sont abondants, plus la part du rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre est faible et plus il fait froid. À l'inverse, il y a réchauffement quand les nuages se raréfient et ne font donc plus obstacle aux rayons du soleil.

La part du rayonnement cosmique qui peut pénétrer dans l'atmosphère est régulée par le jeu de deux facteurs: l'activité solaire et le champ magnétique terrestre. Le soleil propulse en permanence des gaz brûlants vers l'espace, formant ce que l'on appelle le vent solaire. Le champ magnétique terrestre protège la terre du vent solaire en le déviant autour de la planète (voir Fig. 4, p. 5). Il se forme alors un bouclier naturel qui limite de son côté la pénétration du rayonnement cosmique. Donc, plus le soleil est actif et plus le champ magnétique terrestre est fort, plus le rayonnement cosmique pénétrant dans l'atmosphère est faible.

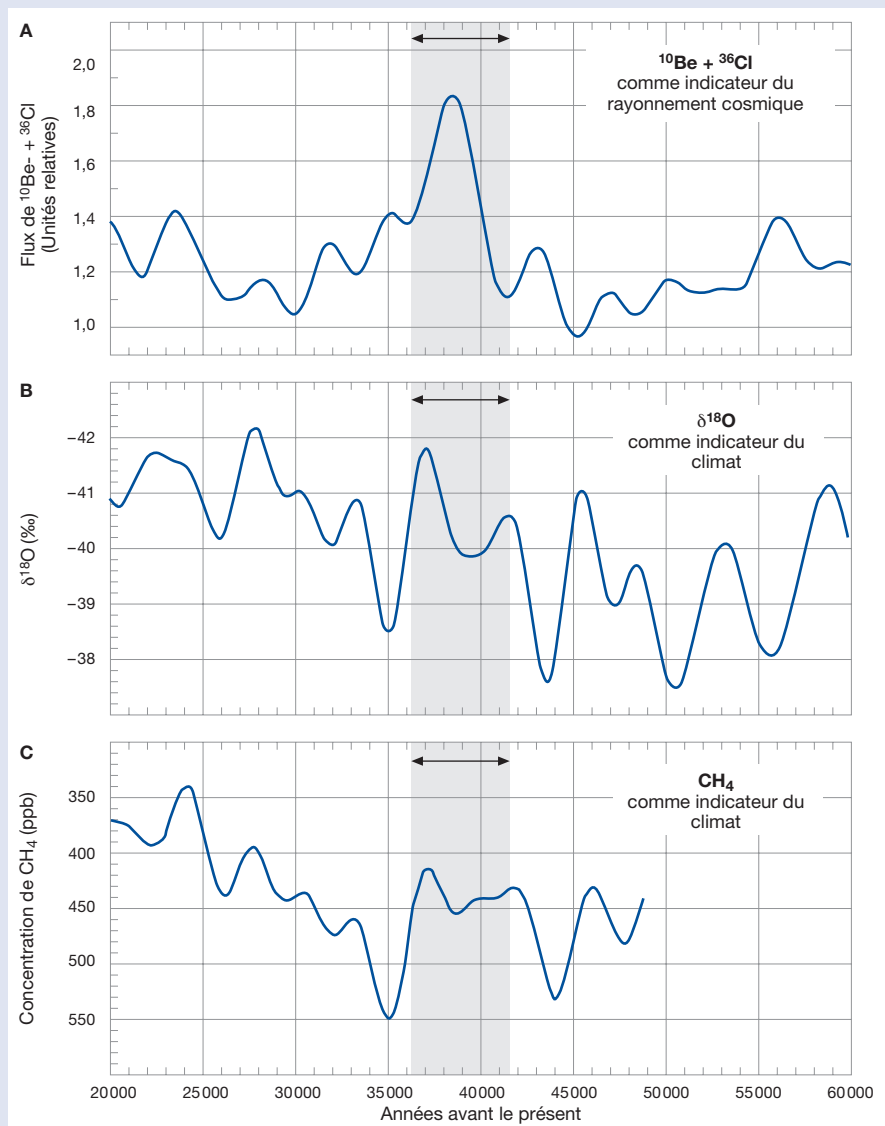


Fig. 4: Comparaison des teneurs combinées en  $^{10}\text{Be}$  et en  $^{36}\text{Cl}$  (A) avec les paramètres climatiques  $\delta^{18}\text{O}$  (B) et  $\text{CH}_4$  (C) à partir de l'analyse de la carotte glaciaire GRIP. Suite à un affaiblissement du champ magnétique terrestre il y a environ 40 000 ans (zone grisée), l'intensité du rayonnement cosmique pénétrant dans l'atmosphère a fortement augmenté, stimulant la formation de  $^{10}\text{Be}$  et de  $^{36}\text{Cl}$ . Contrairement à ce que stipule l'hypothèse danoise, les deux paramètres climatiques n'indiquent aucun refroidissement pendant cette période. Les coefficients de corrélation calculés sont pratiquement nuls. ppb = parts per billion = parties par milliard.

## Un fort rayonnement cosmique incident il y a 40 000 ans

Si on remonte encore plus loin dans le passé, la situation change du tout au tout. On constate en effet l'existence il y a environ 40 000 ans d'une période de près de 3000 ans de fort rayonnement cosmique sur la terre. A cette époque, notre planète a subitement perdu son bouclier magnétique, ce qui a permis au rayonnement cosmique de pénétrer presque sans encombre dans l'atmosphère. La cause de ce chamboulement était une baisse dramatique du champ magnétique terrestre dont l'intensité s'est presque annulée, atteignant à peine 10% de sa valeur actuelle. Si l'hypothèse danoise est vraie, la couverture nuageuse globale doit avoir augmenté pendant cette période qui doit donc s'être accompagnée d'un refroidissement du climat [3].

Les carottes de glace du Groenland livrent une fois de plus toutes les informations nécessaires à la vérification de cette hypothèse. La figure 4A indique les données combinées de  $^{10}\text{Be}$  et de  $^{36}\text{Cl}$  qui présentent un pic très net il y a environ 40 000 ans. Ce pic de radionucléides correspond tout à fait à nos attentes puisqu'un fort rayonnement cosmique incident induit une production accrue de radionucléides dans l'atmosphère. Dans le même temps, deux paramètres indicateurs du climat ont également été mesurés dans la glace carottée, le  $\delta^{18}\text{O}$  et le méthane. Si l'on croit l'hypothèse danoise, le climat a dû se refroidir pendant la période considérée, ce qui se traduirait par une baisse sensible des teneurs en  $\delta^{18}\text{O}$  et en méthane. Or ce n'est pas du tout le cas (Fig. 4B et C). Les deux paramètres présentent certes une bonne concordance entre

eux mais ne s'accordent pas avec la courbe des radionucléides. Nos résultats sont donc en net désaccord avec l'hypothèse des Danois. Etant donné que tous les paramètres ont été mesurés simultanément dans la même carotte de glace, ce résultat est totalement indépendant de l'exactitude de la datation de la glace.

## Une interprétation un peu trop ambitieuse

Entre-temps, de nouveaux points de dissension sont apparus, notamment lors de l'analyse de nouvelles données sur la couverture nuageuse qui ne suivent plus l'évolution du rayonnement cosmique. En ce moment, l'hypothèse danoise est donc plutôt en perte de vitesse, même si ses défenseurs n'ont pas encore dit leur dernier mot. Il s'avère une fois de plus que le climat est bien trop complexe pour pouvoir expliquer ses changements à partir d'un seul mécanisme. Par contre, de plus en plus d'éléments semblent indiquer que le soleil aurait effectivement joué un rôle central avant 1970, sans toutefois utiliser le biais du rayonnement cosmique mais bien directement de par les variations de l'intensité de son éclairage (voir l'article de M. Vonmoos, p. 8). Le réchauffement important de ces 30 dernières années ne peut cependant s'expliquer par l'activité du soleil. Tout semble indiquer qu'il serait bien le résultat d'une augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère causée par les activités humaines. Nous saurons très certainement la vérité d'ici quelques années, mais nous n'aurons plus alors la possibilité de limiter les conséquences de nos actes.

Jürg Beer, portrait p. 5

- [1] Svensmark H., Friis-Christensen E. (1997): Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics* 59, 1225–1232.
- [2] Calder N. (1997): *The Manic Sun*; Edition Pilkington Press, London.
- [3] Wagner G., Livingstone D.M., Masarik J., Muscheler R., Beer J. (2001): Some results relevant to the discussion of a possible link between cosmic rays and the Earth's climate. *Journal Geophysical Research* 106, 3381–3388.
- [4] Jones P.D., Parker D.E., Osborn T.J., Briffa K.R. (2001): Global and hemispheric temperature anomalies – land and marine instrumental records. In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge, USA.
- [5] Neftel A., Moor E., Oeschger H., Stauffer B. (1985): Evidence from polar cores for the increase in atmospheric  $\text{CO}_2$  in the past two centuries. *Nature* 315, 45–47.
- [6] Keeling C.D., Whorf T.P. (2003): Atmospheric  $\text{CO}_2$  concentrations (ppmv) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Made available online by C.D. Keeling.