

La glace et le climat

Près de 80% des réserves mondiales en eau douce sont immobilisées sous forme de glace dans les deux régions arctique et antarctique. Ces glaces constituent une archive naturelle d'une valeur exceptionnelle étant donné qu'elles renferment une foule d'informations sur le climat emmagasinées au cours de centaines de milliers d'années. Mais les données historiques concernant les glaces de lacs sont elles aussi sources d'informations précieuses sur le climat, comme en témoignent les études menées sur le lac Baïkal et le lac de St-Moritz. Il existe d'autre part une substance assez mystérieuse qui ressemble à la glace, l'hydrate de méthane. Accumulée dans les sédiments marins, elle peut être libérée vers la surface sous l'effet de changements environnementaux mineurs, notamment de la température de l'eau. Dans ce cas, de grandes quantités de méthane, gaz à effet de serre des plus puissants, seraient libérées dans l'atmosphère, produisant une accélération dramatique du réchauffement planétaire.

On associe volontiers l'idée de l'eau à celle de torrents de montagne ou de lacs majestueux dans lesquels se reflètent des sommets enneigés. Mais l'eau se présente également dans d'autres états physiques, c'est-à-dire sous forme de gaz quand elle s'évapore en passant par exemple de la mer vers les terres, ou bien sous forme de neige et de glace quand la température est inférieure à zéro. Si on considère la répartition des différents états physiques de l'eau douce sur la terre, on est surpris de constater que son état de loin le plus fréquent n'est pas l'état liquide des lacs et rivières mais bien plutôt l'état solide de la glace (Fig. 1).

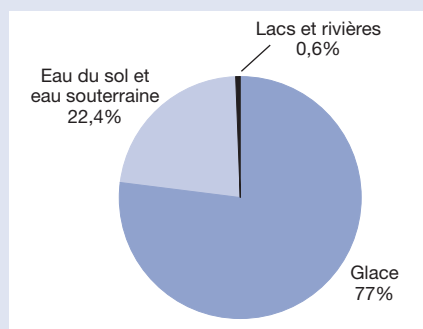


Fig. 1: Répartition des ressources en eau douce de la Terre. La part de la vapeur d'eau atmosphérique n'est pas représentée. Elle ne représente que 0,04% du total.

Cette eau «gelée» est principalement stockée au niveau des deux pôles: 99,4% de la glace terrestre se trouvent en antarctique et au Groenland. La calotte glaciaire antarctique présente ainsi par endroit une épaisseur avoisinant les 5 km, tandis que celle du Groenland atteint tout de même l'épaisseur respectable de 3 km. La part, malheureusement en constante diminution, des glaciers continentaux des latitudes moins élevées ne représente à l'inverse que 0,6% des réserves de glace.

Or la glace est en réalité bien plus que de l'eau gelée. Elle renferme une grande quantité d'informations des plus précieuses sur les changements passés et présents de l'environnement planétaire. Beaucoup d'éléments autrefois engloutis par la glace n'attendent que d'être mis à jour et étudiés [1].

La glace est une archive naturelle

Il n'existe presque rien qui ne puisse être stocké pour très longtemps dans les archives de glace. Mais comment les glaces deviennent-elles des archives naturelles? Les glaces continentales se forment à partir de neige. Quand elle vient de tomber, la neige est tout d'abord de consistance poudreuse et contient près de 90% d'air (Fig. 2). Mais au bout de quelques jours à peine, les

cristaux de glace se densifient, s'agglomèrent et forment du névé. Sous la pression de nouveaux apports de neige, ce névé se densifie et durcit jusqu'à ce qu'à une certaine profondeur les grains qui le composent soient assez comprimés pour former de la glace (Fig. 3).

La neige et la glace ne sont cependant pas uniquement constituées d'eau. En effet, lors de la formation des nuages, la vapeur d'eau se condense autour de noyaux de condensation qui sont généralement des particules aérosols de composition chimique des plus variables. Ensuite, lors de leur lente chute vers la surface de la Terre, les flocons de neige peuvent entraîner diverses substances se trouvant sur leur passage. Enfin, les éléments les plus divers peuvent s'accumuler sur une couche de neige fraîche: des grains de pollen, des poussières d'origine volcanique ou désertique ou encore des éléments plus spectaculaires comme l'homme préhistorique Ötzi ou des dépouilles de mammouths.

Le fait que tous ces éléments arrachés à l'environnement soient congelés et donc parfaitement conservés explique déjà à lui seul toute la valeur de la glace en tant qu'archive naturelle [2].

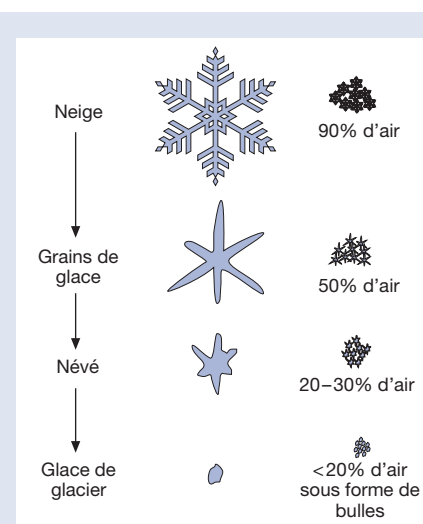


Fig. 2: Formation de la glace de glacier à partir de la neige.

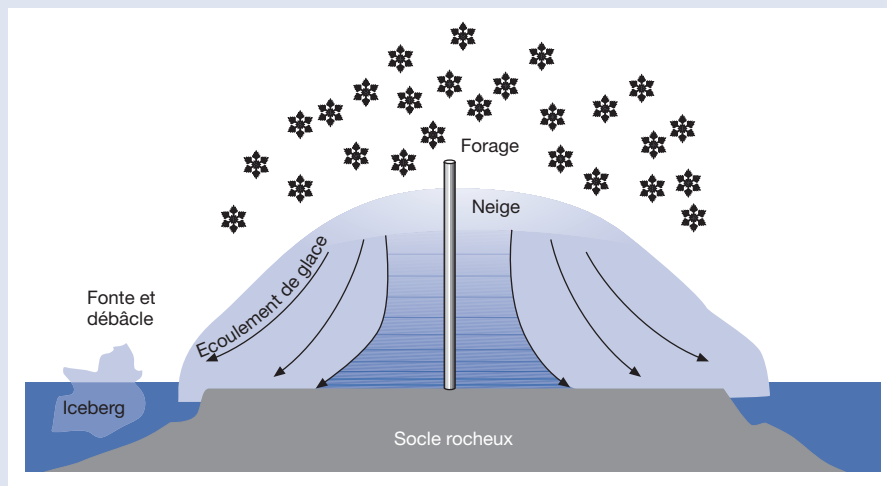


Fig. 3: Structure de l'inlandsis polaire (en coupe). Dans la partie supérieure de la calotte, de la neige se transforme continuellement en glace qui s'écoule lentement vers la mer où elle fond ou se détache en blocs en formant des icebergs (c'est ce que l'on appelle la débâcle). L'écoulement de la glace s'accompagne d'un amincissement des couches annuelles avec la profondeur.

La carotte de glace GRIP

Le carottage des inlandsis polaires représente un défi à la fois technique et logistique. L'installation d'un campement de forage et la réalisation de carottages pendant plusieurs étés à 3000 ou 4000 m d'altitude et à plus de 1000 kilomètres de toute trace de civilisation constituent une entreprise pratiquement irréalisable sans coopération internationale. Les premiers forages ayant permis de traverser toute la calotte glaciaire pour atteindre la roche sous-jacente datent de près de 40 ans. Une douzaine de projets similaires ont été réalisés depuis. L'une des dernières grandes campagnes de forage a été menée au Groenland Central dans le cadre du projet GRIP (Greenland Ice core Project). De 1990 à 1992, des scientifiques venus de Belgique, du Danemark, d'Allemagne, d'Angleterre, de France, d'Islande, d'Italie et de Suisse ont creusé une carotte de glace de 3029 m de long et de 10 cm de diamètre renfermant les précipitations des 100 000 dernières années.

Au cours de longues négociations, les équipes de chercheurs ont tenté de se partager la carotte de glace de façon aussi équitable que possible. Près de 50 paramètres différents devaient en effet être étudiés, allant de la structure de la glace aux poussières et cendres volcaniques en passant par divers isotopes et autres substances chimiques. Cette véritable «quadrature du cercle» était encore aggravée par le fait qu'une certaine partie de la carotte devait être conservée pour d'éventuelles études et vérifications à venir.

Le forage a été effectué à l'aide d'un caroteur mécanique à moteur électrique spécialement conçu à cet effet. L'appareil, pouvant être introduit dans le trou de forage à l'aide

d'un câble en acier, était en mesure de prélever à chaque opération une carotte de 2,5 m de long au maximum. Pour éviter que le trou de forage ne se referme progressivement sous la pression énorme de la glace, il a été comblé à l'aide d'un liquide ne gelant pas encore à $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (température annuelle moyenne au lieu du forage) et présentant la même densité que la glace. Le caroteur a ensuite été ramené à la surface pour en extraire la glace carottée.

Après avoir été mesurés et numérotés, les morceaux de glace ont été les uns après les autres soumis à une première étude suite à laquelle de premiers sous-échantillons ont été constitués. Les morceaux de carotte ont ensuite été subdivisés en portions de 55 cm de long qui, conditionnées dans des sacs en plastique, ont été transportées par avion à Copenhague dans des caisses en polystyrène bien isolantes. C'est là qu'ils ont alors été découpés selon le plan négocié pour être envoyés aux équipes de recherche correspondantes.

Les radionucléides cosmogéniques dans la glace

L'information à laquelle s'intéresse tout particulièrement l'EAWAG dans la carotte GRIP est fournie par un radionucléide cosmogénique, le béryllium 10 (^{10}Be). Il s'agit d'un isotope radioactif de l'élément béryllium qui se forme en permanence dans l'atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique et qui se dépose donc en continu à la surface de la Terre par le biais des précipitations (voir encadré). La quantité de ce cosmonucléide qui se forme dans l'atmosphère est cependant extrêmement faible: seuls 1 million d'atomes de ^{10}Be se déposent chaque année sur chaque cm^2 de surface terrestre. Il

n'est donc pas surprenant qu'il faille recourir à une méthode extrêmement sensible, la spectrométrie de masse par accélérateur, pour détecter et compter chacun de ces atomes dans la glace (voir l'article de S. Bollhalder, p. 6).

Reconstitution du paléoclimat

Mais pourquoi se donner tant de peine pour compter ces quelques atomes de ^{10}Be ? C'est principalement parce que ce cosmonucléide livre des informations sur l'activité solaire et la force du champ magnétique terrestre du passé. En effet, le taux de formation du ^{10}Be dans l'atmosphère n'est pas constant mais dépend notamment de l'activité du soleil [3]: Le rayonnement cosmique responsable de cette formation provient de notre galaxie, elle-même constituée d'environ 100 milliards d'étoiles similaires à notre soleil. Quand il se rapproche du système solaire, il entre tout d'abord en collision avec l'héliosphère, un espace sphérique d'un rayon de 15 milliards de kilomètres qui entoure le soleil. L'héliosphère est formée par ce que l'on appelle le vent solaire, un flux très rapide de gaz ionisé émanant du soleil et porteur de champs magnétiques solaires. De ce fait, le vent solaire joue un rôle de bouclier contre le rayonnement cosmique (Fig. 4) et atténue donc la formation de cosmonucléides dans l'atmosphère. Autrement dit: plus le soleil est actif, plus la production de ^{10}Be est faible. Nous disposons ainsi d'une méthode certes délicate et laborieuse mais en tout point remarquable d'étude de l'histoire du soleil et des fluctuations de son activité (voir les articles de M. Vonmoos, p. 8 et de R. Muscheler, p. 11). A partir des données sur le béryllium 10, il a d'autre part été possible de tester une hypothèse émise à la fin des années 1990 par des chercheurs danois, hypothèse selon laquelle le rayonnement cosmique influencerait sur le climat terrestre (voir l'article de J. Beer, p. 16).

Le taux de formation du ^{10}Be dans l'atmosphère est d'autre part influencé par le champ magnétique terrestre. Les lignes de champ qui entourent la terre d'un pôle à l'autre ne laissent pénétrer les particules chargées du rayonnement cosmique que si celles-ci disposent de suffisamment d'énergie (plus exactement sous la forme d'impulsions par unité de charge) pour les traverser. Ainsi, plus le champ géomagnétique est fort, plus il protège du rayonnement cosmique et plus la production de ^{10}Be dans l'atmosphère est faible. L'étude de roches et de sédiments volcaniques montre que le champ magnétique terrestre a fortement varié au cours des millénaires. Conformément à nos attentes, ces fluctuations ont

elles aussi été enregistrées dans les glaces polaires et cette évolution peut être reconstituée (voir l'article de J. Beer, p. 14).

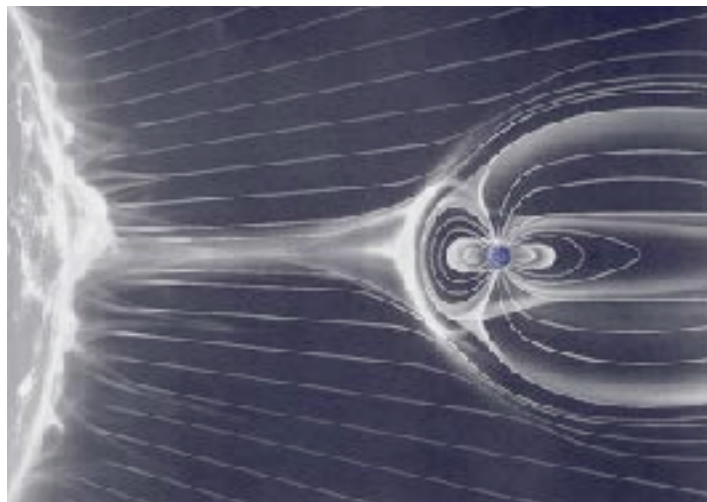
La couverture de glace des lacs: un autre paramètre climatique

La glace ne constitue pas uniquement une archive de valeur pour l'étude de l'activité solaire et du magnétisme terrestre. L'étude historique de la couverture de glace des lacs fournit elle aussi de précieuses informations sur l'évolution plus récente du climat (voir l'article de D. Livingstone, p. 19). On dispose ainsi par exemple de relevés quasi-continus de la durée des glaces du lac Suwa, au Japon, depuis 1443. Il s'agit là d'une série de données unique en son genre qui a trouvé une large utilisation dans l'étude historique du climat du Nord-Pacifique. Pour la Suisse, la série de données la plus longue est celle du Lac de St-Moritz qui remonte à 1832. Dans un autre projet, l'EAWAG a tenté de savoir s'il existait une relation entre la couverture de glace des lacs et l'Oscillation Nord-Atlantique (voir l'article de D. Livingstone, p. 23). L'Oscillation Nord-Atlantique est un phénomène climatique qui se produit particulièrement en hiver entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande. Elle est à l'origine de forts vents d'ouest qui, chargés d'air marin chaud et humide, balayent l'Europe d'ouest en est. Cette oscillation est donc porteuse d'hivers doux et humides en Europe et dans une grande partie de l'Asie centrale et donc d'un dégel plus précoce des lacs de ces régions du monde [4].

La glace des hydrates de méthane

Quittons maintenant la glace en tant que telle et en tant qu'indicateur paléoclimatique pour nous pencher sur les hydrates de méthane. Il s'agit là d'un mélange gelé d'eau (donc de glace) et de méthane. Ces composés se forment à basse température

Fig. 4: Le champ magnétique du vent solaire percute le champ magnétique terrestre. Ces deux champs magnétiques forment alors un bouclier naturel qui affaiblit le rayonnement cosmique qui pénètre dans l'atmosphère en provenance de l'espace.



et à forte pression, par exemple dans les sédiments marins profonds, et ne sont stables que dans ces conditions. Dans le projet communautaire CRIMEA, un groupe international de recherche auquel participe l'EAWAG tente d'évaluer le danger potentiel que représentent les hydrates de méthane pour l'environnement (voir l'article de C. Schubert, p. 26). En effet, des changements minimes des conditions environnementales, par exemple un léger réchauffement de l'eau de mer ou des variations de pression dues à des fluctuations du niveau de la mer, peuvent provoquer une libération et donc une désintégration de ces hydrates de gaz. Des quantités très importantes de méthane se libéreraient alors dans l'atmosphère. Etant donné que le méthane est un gaz à effet de serre encore plus puissant que le dioxyde de carbone, la déstabilisation des hydrates de méthane pourrait avoir des conséquences dramatiques sur le climat [5].

Un regard en arrière pour entrevoir l'avenir

Les hommes ont toujours rêvé de prévoir l'avenir. Tandis que les prophètes du passé n'avaient qu'un succès très relatif en lisant

les cartes divinatoires ou le marc de café, les scientifiques d'aujourd'hui misent sur des modèles numériques extrêmement complexes pour prédire le climat à venir. Les résultats livrés par ces modèles informatiques ne peuvent cependant être fiables que si ces derniers donnent une représentation conforme à la réalité des principaux processus impliqués et de leurs interactions ou interrelations. Or, avant de pouvoir intégrer des informations correctes dans la programmation, il faut étudier ces processus sur de longues périodes. Nous ne pourrions donc espérer prédire l'avenir que lorsque nous aurons bien compris les changements climatiques du passé. Seul celui qui sait regarder en arrière peut donc être un bon prophète.



Jürg Beer, physicien, dirige l'équipe «Traceurs radioactifs» du département «Eaux superficielles» de l'EAWAG. Professeur titulaire de l'EPF de Zurich, ses recherches se concentrent sur les radionucléides cosmogéniques et l'influence de l'activité solaire sur le climat.

Formation des radionucléides cosmogéniques

Les radionucléides cosmogéniques apparaissent suite à un processus que les alchimistes ont tenté en vain de reproduire au Moyen-Âge, la transmutation de la matière, comme par exemple de l'azote en béryllium ou de l'argon en chlore. Ce que les alchimistes n'ont pas réussi à produire est pour la nature un jeu d'enfant. Le rayonnement cosmique constitué de particules hautement énergétiques (des protons et des noyaux d'hélium) pénètre dans l'atmosphère terrestre, entre en collision avec les atomes d'oxygène, d'azote et d'argon de l'air et les désintègre. Ces collisions donnent naissance à toute une série de particules nouvelles, entre autres de neutrons, qui viennent à leur tour heurter d'autres atomes qu'elles peuvent briser. Alors que les nouveaux fragments formés sont en général instables et se retransforment rapidement en isotopes stables indiscernables de ceux présents à l'origine, le béryllium 10 et le chlore 36 persistent très longtemps grâce à des périodes de demi-vie très longues, respectivement de 1,5 millions d'années et de 301 000 ans. Après avoir séjourné en moyenne un an dans l'atmosphère, ces cosmoneutrons se déposent à la surface de la Terre, en général avec les précipitations. Si un atome de ^{10}Be a élu un flocon de neige pour descendre sur la Terre, il est bien possible qu'il se retrouve dans un glacier ou une calotte de glace polaire.

- [1] Bradley R.S. (1985): Climate and climate variability. In: Quaternary Paleoclimatology – Methods of Paleoclimatic Reconstruction (ed. R.S. Bradley). Allen and Unwin, Boston, p. 11–46.
- [2] Beer J. (1995): Mémoire climatique des glaces polaires. EAWAG news 38f, 3–5.
- [3] Beer J., Mende W., Stellmacher R. (2000): The role of the Sun in climate forcing. Quaternary Science Reviews 19, 403–415.
- [4] Straile D., Livingstone D.M., Weyhenmeyer G.A., George D.G. (2003): The response of freshwater ecosystems to climate variability associated with the Nord Atlantic Oscillation. In: The North Atlantic Oscillation – Climatic Significance and Environmental Impact (ed. J.W. Hurrell). American Geophysical Union, Washington, p. 263–279.
- [5] Kvenvolden K.A. (1988): Methane hydrates and global climate. Global Biogeochemical Cycles 2, 221–229.