

Drainage et vitesse d'écoulement

Nous avons établi une carte des vitesses d'accumulation de la neige, soit le flux d'entrée. Il nous reste à estimer le flux de sortie, c'est-à-dire l'écoulement de la neige. Une fois tombée, la neige devient plus dense et se transforme en glace. La transformation a lieu dans les 100 premiers mètres sous la surface, en quelques milliers d'années, ce qui est peu par rapport aux durées en jeu dans les calottes polaires. La glace ainsi formée s'écoule par gravité du centre de la calotte vers les bords.

La glace s'écoule d'abord par déformation, comme un fluide visqueux. Certes, si l'on donne un coup de marteau (une forte contrainte) sur un glaçon, il casse. En revanche, quand on appuie dessus (la contrainte est faible) suffisamment longtemps, le glaçon s'aplatit. C'est le cas dans la calotte polaire. La contrainte – la gravité – est faible, mais les durées sont suffisamment longues pour que la glace se déforme et s'écoule vers la mer. Dans un corps visqueux dit linéaire, comme l'eau, la déformation est proportionnelle à la contrainte. La glace est un corps visqueux non linéaire, pour lequel la viscosité dépend de la contrainte. Les glaciologues appliquent la loi de Glen, où la déformation est proportionnelle à la contrainte élevée à une puissance, de l'ordre de 3.

Toutefois, la réalité est plus compliquée. Tout d'abord, les paramètres de cette loi dépendent des caractéristiques physiques des cristaux, par

exemple de leurs défauts ou leurs joints de grains, qui varient eux-mêmes en fonction des contraintes et du type de glace. Dans la partie supérieure des calottes, où règne une contrainte plus faible qu'au centre, la valeur de la puissance serait inférieure à 3, tandis que pour la glace recristallisée des couches proches de la base, l'exposant serait égal à 3. Enfin, la viscosité de la glace augmente de façon exponentielle avec la température, en suivant la loi d'Arrhenius. Pour une même contrainte, la déformation est 500 fois plus importante à 0 °C qu'à -50 °C. Or, la calotte polaire est soumise à des différences de températures de cette ampleur : il fait -60 °C à la surface et près de 0 °C au contact du socle terrestre, où le flux géothermique qui remonte du centre de la Terre réchauffe la glace.

Pour calculer l'écoulement, on prend aussi en compte les gradients de températures entre la surface et la base. Cependant, les températures de la glace dépendent elles-mêmes de la vitesse de l'écoulement : elles augmentent avec la déformation, et donc avec la vitesse d'écoulement (quand on tord un morceau de plastique, il s'échauffe). Plus la température est élevée, plus la glace se déforme et s'écoule, et ainsi de suite.

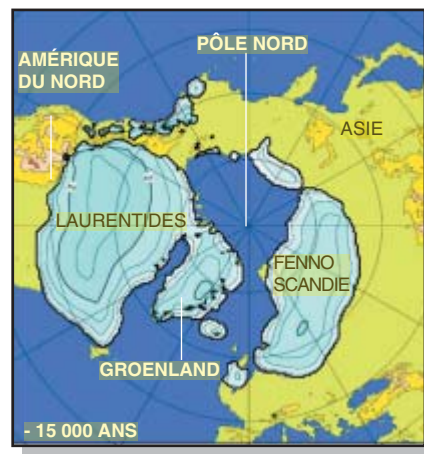
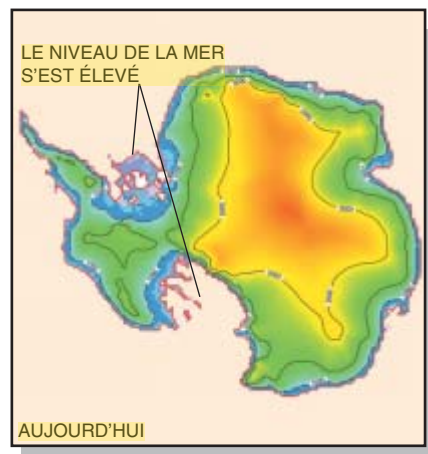
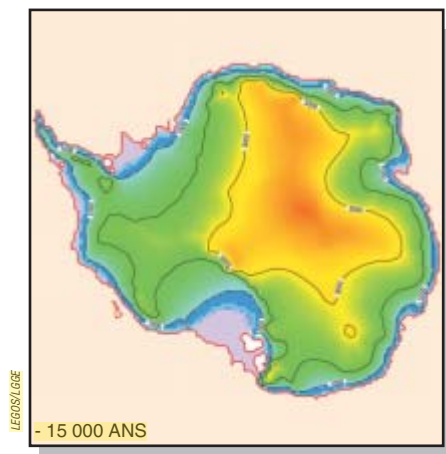
La glace s'écoule par déformation, mais aussi par glissement sur le socle, lorsque la température à la base atteint le point de fusion de la glace. Le plus bel exemple est le «lac» de Vostok, le plus grand lac sous-glaciaire au monde. Il est situé à une profondeur

de 3 000 mètres environ et s'étend sur plus de 300 kilomètres de longueur et 40 kilomètres de largeur.

La glace s'écoule dans la direction de la plus grande pente de surface, indiquée par les relevés topographiques. On estime le débit de la glace en fonction de la pente et de la vitesse d'accumulation de la neige déposée depuis un dôme (un plateau). On en déduit une vitesse moyenne d'écoulement en tenant compte de l'épaisseur locale de la glace. En 2000, nous avons dressé une cartographie des vitesses moyennes d'écoulement ainsi calculées pour l'Antarctique (voir la figure 3).

L'écoulement n'est ni aussi régulier, ni aussi uniforme qu'on l'imaginait auparavant. Les vitesses sont faibles au centre, inférieures à un mètre par an, puis augmentent jusqu'à atteindre 100 mètres par an en périphérie. Ces vitesses sont irrégulières et dépendent du relief. On observe des chenaux d'écoulement rapide, toujours dirigés du centre vers la mer, où le flux est de 10 à 100 fois supérieur à des flux voisins, distants de quelques centaines de mètres seulement. L'effet de ces «autoroutes de glace» se fait sentir à plusieurs centaines de kilomètres à l'intérieur du continent. Ces chenaux évacuent un volume de glace très important : plus de 80 pour cent des glaces se jettent dans la mer en transitant par ces voies rapides qui couvrent 20 pour cent des côtes seulement (voir l'encadré page 66).

La glace qui s'écoule, par déformation ou par glissement, représente le flux de sortie : une fois à proximité



4. MODÉLISATION DE L'ANTARCTIQUE IL Y A 15 000 ANS, lors du dernier maximum glaciaire (à gauche) et aujourd'hui (au centre). Les zones de basse altitude (en mauve) sont moins étendues aujourd'hui, car le niveau de la mer a monté. On a aussi reconstitué les calottes de l'hémisphère Nord lors du dernier maximum glaciaire, il y a 15 000 ans (à droite). La calotte est représentée en projection polaire, avec l'Amé-

rique du Nord à gauche, l'Eurasie à droite. Les calottes de glace étaient beaucoup plus étendues : les Laurentides recouvraient l'Amérique du Nord et la Fennoscandie le Nord de l'Europe et de l'Asie. Le niveau des mers était alors 120 mètres plus bas ; c'est pourquoi certaines régions, tel le détroit de Béring, étaient émergées. Une immense mer de glace recouvrait le pôle Nord toute l'année.

de la mer, elle fond ou se détache sous forme d'icebergs. En fonction de l'équilibre entre les flux de sortie et d'entrée, la calotte est stable, elle augmente de volume ou fond au contraire, ce qu'évaluent certains climatologues quand ils modélisent les conséquences du réchauffement climatique.

Les calottes ne fondent pas !

Comment les calottes glaciaires réagissent-elles au changement climatique ? Les modèles annoncent un réchauffement dont les effets varieront d'une région à l'autre, mais tous prédisent

une augmentation de la température aux pôles. Déjà, des mesures de plus en plus nombreuses montrent que l'étendue et l'épaisseur des glaces sur les mers qui entourent l'Arctique diminuent. Elles indiquent aussi que le niveau des océans s'est élevé de 15 centimètres depuis le début du XX^e siècle. Un tiers de cette hausse est dû à la dilatation thermique des eaux. Un autre tiers proviendrait de la fonte des glaciers tempérés. On ignore l'origine du dernier tiers. Proviendrait-il des calottes polaires ?

L'élévation de température de 0,6 °C observée en Antarctique depuis

le début du XX^e siècle a provoqué une augmentation des précipitations de trois à cinq pour cent. Comme il fait froid, la glace ne fond pas, et la quantité de glace déposée fait baisser le niveau de la mer de -0,2 millimètre par an. Au centre du Groenland, le phénomène serait identique ; en revanche, la glace fond sur les côtes. Donc, le réchauffement actuel augmenterait les masses de glace au centre et diminuerait celles sur les côtes. Globalement, le Groenland se déformerait sans pour autant apporter une contribution notable à la variation du niveau des océans.

Les satellites mesurent en direct le déplacement des glaciers

Le glacier Lambert est l'un des plus grands glaciers du monde. Sur la côte, il se jette dans l'Amery, une plate-forme de glace flottante. Ses affluents, Fischer et Mellor, sont aussi d'importants glaciers émissaires, c'est-à-dire des voies rapides d'écoulement de la glace, et leur largeur atteint parfois 80 kilomètres. Ces glaciers s'écoulent le plus souvent dans les vallées présentes dans le socle rocheux. Le radar imageur du satellite européen ERS a fourni des images de ces glaciers.

Le radar embarqué à bord du satellite envoie une onde de fréquence très élevée et mesure le temps qu'elle met pour revenir au satellite après s'être réfléchi sur la surface de la glace. Cette

onde balaie la surface du glacier étudié, et la durée du retour varie d'un point à un autre en fonction de l'attitude du point considéré. On obtient ainsi une image (*en haut*) de l'intensité du signal réfléchi et de la phase liée au relief local.

Le radar fournit aussi les vitesses d'écoulement grâce à l'interféromètre, qui mesure le déplacement relatif du glacier vu à deux moments différents. Une première image est prise, puis une seconde, 24 heures plus tard. Si la surface de la glace n'était pas modifiée, alors les deux images seraient identiques. En réalité, la glace s'écoule, et sa surface change. Les durées que l'onde met à rallier le satellite sont différentes d'un jour à l'autre pour tous les points sauf les rochers. On combine les deux images de phases prises à 24 heures d'intervalle pour former un interférogramme (*en bas*). On attribue des couleurs aux valeurs des différences mesurées pour chacun des points, et des franges apparaissent sur l'image. Le déplacement d'un point entre les deux prises de vue se mesure en comptant les franges. Chaque frange correspond à un déplacement relatif de 28 millimètres. Plus elles sont rapprochées, plus le déplacement relatif est important. On voit les glaciers émissaires apparaître et l'on mesure leurs vitesses d'écoulement.

Le radar permet aussi de repérer facilement la ligne d'échouage (*en pointillés*), à partir de laquelle la glace ne repose plus sur le socle terrestre, mais se met à flotter sur l'océan. Cette plate-forme de glace flottante (Amery), d'une épaisseur de plusieurs centaines de mètres, est en effet soumise à la marée. Elle monte et descend avec une amplitude atteignant 1,5 mètre. La ligne d'échouage définit la frontière de la calotte polaire (la glace flottante ne fait plus partie de la calotte). Elle constitue un bon indicateur des variations climatiques : dès que le niveau moyen des océans monte, la ligne recule vers le continent, et la masse de la calotte glaciaire diminue. Les glaciologues suivent les fluctuations de cette ligne, excellent marqueur de la dynamique des calottes.

Benoît LEGRESY, Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales à Toulouse (CNRS-CNES).

Le glacier Lambert vu par le radiomètre du satellite ERS. Une seule image (*en haut*) montre le relief. Deux images prises à un jour d'intervalle forment un interférogramme (*en bas*). Le nombre de franges est proportionnel à la vitesse d'écoulement du glacier. Les franges entre le glacier Lambert et les glaciers voisins sont très rapprochées, ainsi que les zones entre le glacier et les escarpements rocheux : le glacier Lambert s'écoule à plus de 600 mètres par an. En revanche, la glace à côté du glacier s'écoule de façon lente et régulière (quelques mètres par an).

