

se différencient de celles d'été, car leurs grains sont plus petits et elles sont donc plus denses.

Au milieu des années 1960, les premiers carottages profonds, à plus de 1 500 mètres, sont entrepris. Comme la glace s'accumule, plus on creuse, plus on trouve de la vieille glace. Ces carottes sont des photographies du passé. Elles indiquent la température, la composition et la pression de l'air, ainsi que les concentrations en impuretés et en aérosols qui régnaient lors des époques passées. On déduit la température de l'air du rapport des concentrations en isotopes de l'oxygène présentes dans une couche : l'eau qui contient l'isotope 16 s'évapore plus facilement des océans que l'eau composée de l'isotope 18, et cette différence s'accroît lorsque la température atmosphérique diminue. La concentration en oxygène 16 dans la neige est plus élevée lors des périodes froides. On déduit la composition, la pression, les impuretés et les aérosols des bulles d'air emprisonnées dans la glace. Le carottage de Vostok a ainsi livré 420 000 ans d'histoires climatiques. Les carottes constituent une source très riche d'informations, à condition toutefois de pouvoir dater les échantillons. En résumé, on estime les dates à partir des vitesses d'accumulation : par exemple, quand on estime à un mètre l'épaisseur de neige accumulée en une année dans une zone, on en déduit qu'une profondeur de 200 mètres correspond à 200 ans. De telles estimations sont grossières : les vitesses d'accumulation varient au cours du temps, la glace s'écoule, etc. Ces difficultés de datation ont motivé les premières modélisations physiques de la glace des calottes. Aujourd'hui, on prélève des carottes dans des zones plates, où l'écoulement est minimal.

Des mesures millimétriques par satellite

Les pôles, immenses et difficiles d'accès, subissent des conditions météorologiques si rudes que les mesures *in situ* (les relevés météorologiques, les poses de balises, les carottages...) restent ponctuelles et localisées sur la côte. On peut aussi prendre de la hauteur : les satellites sont devenus les outils de prédilection de l'observation des calottes polaires. Dans les années 1960, la NOAA (*National oceanic and atmospheric administration*) met en orbite le satellite TIROS (*Television Infrared Obser-*



Bernard Gely, Obs. Côte d'Azur

2. LES VENTS CATABATIQUES, extrêmement violents, érodent le relief, déplacent la neige et créent des dunes de neige, nommées sastrugi, près du pôle Sud. On voit l'orientation du vent qui allonge ces structures (il vient de la gauche). Le diffusiomètre, conçu pour mesurer la vitesse du vent sur l'océan, est sensible aux orientations de la surface et permet de mesurer aussi la direction des vents qui soufflent sur la glace.

vation Satellite), équipé de capteurs optiques qui photographient pour la première fois de nombreuses zones inconnues, notamment des mers recouvertes de glace.

Puis arrive l'avènement des premiers capteurs à rayonnement hyperfréquence, capables d'observer à travers les nuages et durant la longue nuit polaire. Grâce à eux, on effectue des mesures en continu tout au long de l'année, et non plus seulement en été. ERS, un des premiers satellites à vocation polaire, envoyé par l'Agence spatiale européenne en 1991, embarque ainsi à son bord quatre instruments à ondes hyperfréquences : l'altimètre, conçu pour mesurer la hauteur de la glace ; le diffusiomètre pour la direction du vent ; le radiomètre, un capteur passif qui mesure le rayonnement émis par la surface de glace ; et le radar imageur qui enregistre le déplacement de la surface. Le diffusiomètre extrait la direction du vent de l'orientation des vagues formées sur la glace. Le radar imageur compare les durées que mettent deux signaux pour atteindre la surface de la glace et s'y réfléchir jusqu'au satellite, et l'on en déduit la vitesse de déplacement de la surface (voir l'encadré page 66).

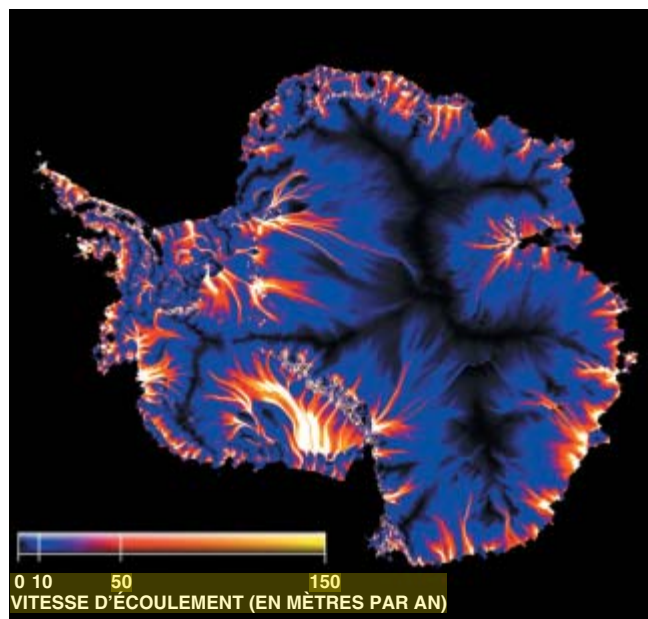
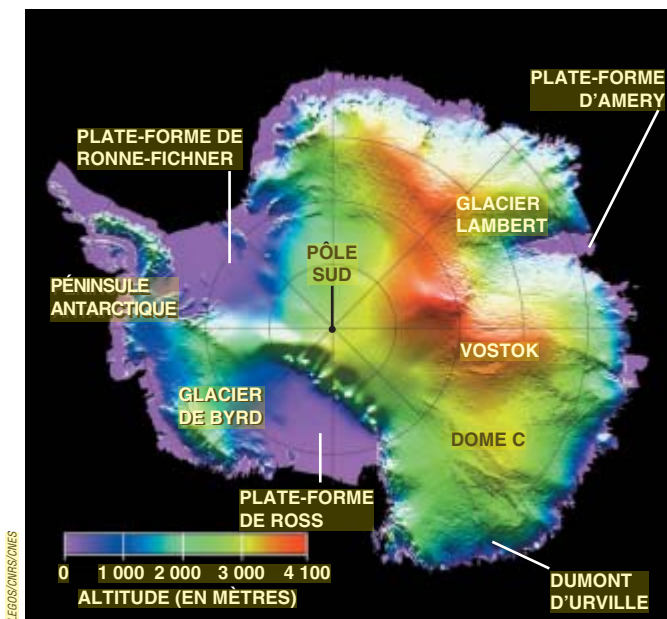
Ces instruments offrent une vision extraordinaire des calottes. D'avril 1994 à mars 1995, ERS a recueilli environ 30 millions de mesures, à partir desquelles la topographie de surface de l'Antarctique a été reconstruite avec

une résolution de deux kilomètres et une précision sur l'altitude de l'ordre du mètre (voir la figure 3). Grâce à ces observations effectuées depuis les satellites, on a amélioré les modèles de la dynamique des calottes polaires.

Précipitations et accumulation de neige

Dans les modèles, la quantité de neige accumulée chaque année sur la calotte constitue l'unique flux d'entrée. La hauteur de la neige mesurée par satellite ne tient pas compte des écoulements et ne représente donc pas la neige accumulée. On cherche à évaluer les vitesses d'accumulation en mesurant les chutes de neige.

Elles sont contrôlées par des mécanismes atmosphériques complexes et différents selon la zone étudiée. Dans la fine bande côtière, à moins de 1 000 mètres d'altitude, les précipitations sont élevées, en moyenne 35 centimètres par an. L'activité cyclonique circumpolaire (des courants de nuages qui tournent sans arrêt autour des pôles) domine et, quand les masses d'air humide pénètrent sur le continent et remontent pour franchir les montagnes, elles se refroidissent, et il neige. Au centre, en revanche, il neige faiblement : 10 centimètres par an en moyenne. L'air y est plus sec, et les nuages sont refroidis par le rayonnement émis par la glace. Quand il fait très froid, des molécules d'eau forment des cristaux et il neige.



3. Topographie de l'Antarctique obtenue par l'altimètre du satellite ERS (à gauche). La résolution horizontale est de cinq kilomètres, et la précision sur l'altitude avoisine le mètre dans les régions centrales. Les points les plus hauts, au centre du continent, culminent à 4 100 mètres. Grâce à cette carte de relief, on a calculé les vitesses d'écoulement de la glace (à droite). Elles tiennent compte des quantités de neige accumulées et des épaisseurs de glace. Au centre, les vitesses d'écoulement sont très faibles. Elles augmen-

tent à proximité des côtes. Cependant, sur les côtes, de grandes différences existent. Des zones où les vitesses d'écoulement dépassent 200 mètres par an en jouxtent d'autres qui sont presque stables. Le glacier Byrd, qui se jette dans la plate-forme de glace de Ross, ou le glacier Lambert qui rejoint l'Amery, sont des grands glaciers émissaires qui évacuent chacun des milliers de kilomètres cubes de glace. Ils sont entourés de chenaux d'écoulements rapides, parallèles et espacés d'une quarantaine de kilomètres.

Toute cette neige déposée ne s'accumule pas. Au Groenland, une partie fond à basse altitude durant l'été. En Antarctique, la neige ne fond pas, mais elle est balayée par les vents. L'air froid (-50°C) dévale les pentes et crée des vents «catabatiques», des vents forts et persistants dus à la gravité. À Dumont d'Urville en Antarctique, par exemple, la vitesse moyenne du vent est de 40 kilomètres par heure, mais le maximum atteint parfois 200 kilomètres par heure. Ces vents déplacent la neige, l'érodent et créent ce que l'on nomme des *sastrugi*, des dunes de neige, qui perturbent les mesures (voir la figure 2). En une nuit, une congère peut se former autour d'une balise. À l'échelle locale, ces vents sont primordiaux, mais, à l'échelle globale, seule une petite fraction des précipitations se perd dans l'océan sous forme de neige soufflée. Les vents favorisent aussi la sublimation de la neige, qui constitue la cause dominante de l'érosion de la calotte, dans certaines régions. On cherche à tenir compte de ces effets dans l'évaluation du flux d'entrée, mais ils sont difficiles à estimer.

L'évaluation des vitesses d'accumulation est d'autant plus complexe qu'elles varient au cours du temps, en fonction de la température moyenne

de l'air à la surface. Les carottages ont montré que cette température évolue par cycles. Des températures inférieures d'environ 10°C à celles d'aujourd'hui correspondent aux périodes glaciaires. Elles ont duré chacune plusieurs dizaines de milliers d'années. D'immenses calottes recouvraient alors le Nord de l'Amérique (les Laurentides) et de l'Eurasie (la Fennoscandie) (voir la figure 4). Lors du dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, le niveau des mers était inférieur de 120 mètres au niveau actuel. Ces périodes glaciaires ont été entrecoupées de courtes périodes chaudes (périodes interglaciaires), qui ont en général duré quelques milliers d'années. Cette alternance glaciaire-interglaciaire provient de la variation de la quantité d'énergie solaire arrivant sur Terre, c'est-à-dire de l'orbite terrestre. Nous vivons actuellement une période chaude qui a commencé il y a environ 10 000 ans.

Les carottages ont aussi montré que les précipitations durant les périodes froides étaient deux fois moins abondantes qu'aujourd'hui. On en déduit que les précipitations sont divisées par deux – et donc les vitesses d'accumulation approximativement – quand les températures diminuent de 10 degrés. Les mesures des préci-

pitations au centre du continent, plus froid, et sur la côte, plus tempérée, confirme cette estimation.

Nous pourrions aussi déduire les vitesses d'accumulation de la taille des grains. Nous pouvons en effet mesurer la taille moyenne des grains dans les premiers mètres sous la glace grâce aux mesures par satellite : les grains volumineux atténuent davantage le signal réfléchi. Or, les grains grossissent avec le temps, à mesure qu'ils s'enfoncent. Quand on trouve des gros grains à une faible profondeur, cela signifie qu'ils n'ont pas été recouverts par de la neige fraîche et qu'il a peu neigé. Au contraire, quand on ne trouve des grains volumineux qu'à une grande profondeur, c'est qu'il a beaucoup neigé.

Nous cherchons aujourd'hui à établir le profil de la taille des grains en fonction du temps. Connaissant leur profondeur, nous pourrions alors connaître la vitesse d'accumulation. Finalement, on a établi des cartes des vitesses d'accumulation, grâce aux cartes de température et aux observations. Au total, on estime à 1 800 gigatonnes la quantité de neige déposée chaque année sur le continent antarctique, et à près de 450 gigatonnes celle qui recouvre les trois plus grandes plates-formes de glace (ces plates-formes sont issues de l'écoulement de la neige dans la mer).