

■ Depuis 1991, l'altimètre d'ERS, satellite européen, permet de mesurer la topographie de la surface de 80 % de l'Antarctique et de la totalité du Groenland. La topographie de surface est une donnée essentielle: elle permet de contraindre les modèles, de les tester ou de les initialiser. Les processus physiques qui agissent sur la glace se manifestent à travers les différentes signatures de la surface dont l'analyse permet d'améliorer la modélisation de l'écoulement. ■

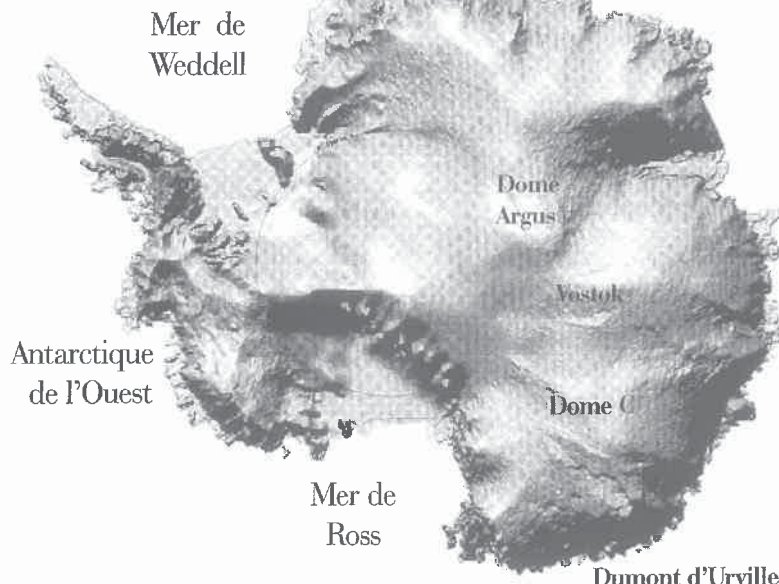


Figure 1 - Carte de la topographie de l'Antarctique, obtenue à partir de l'orbite géodésique d'ERS1. L'altitude dépasse 4 000 m à Dôme Argus. La topographie au sud du parallèle 82°S (cercle) est empruntée à une compilation de mesures in situ.

topographie des calottes glaciaires par altimétrie satellite

Frédérique Rémy - LEGOS (CNES-CNRS-UPS)

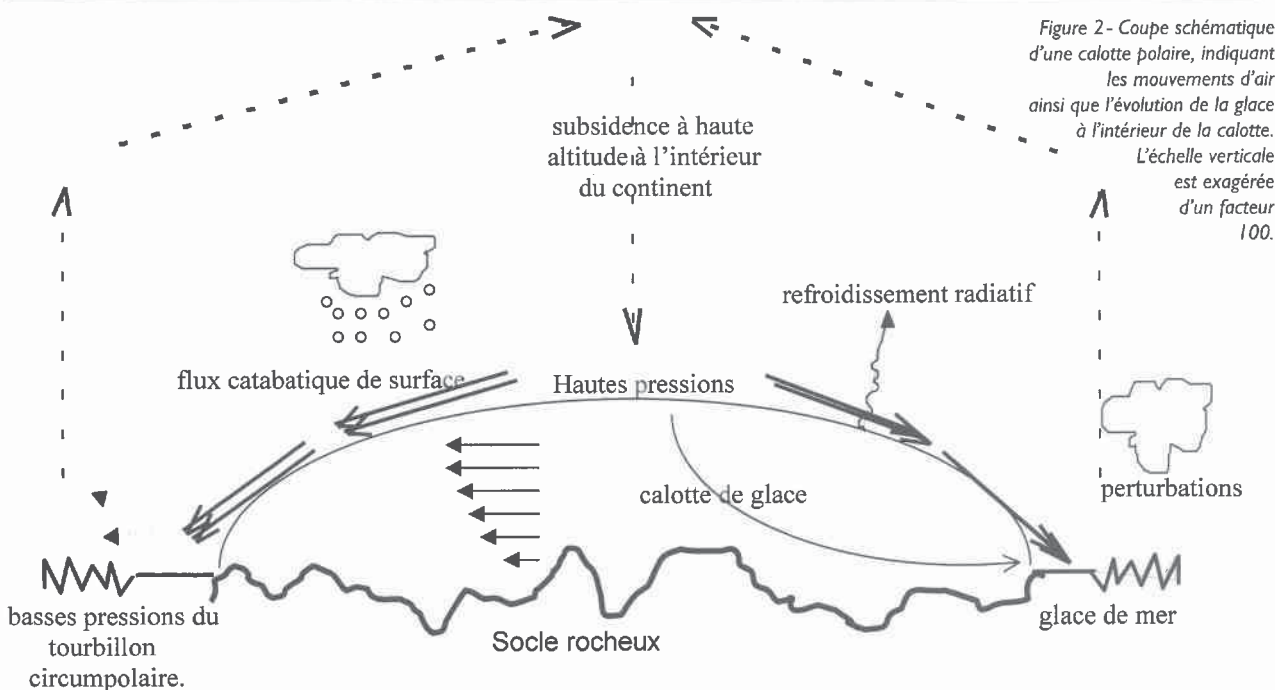
Introduction

Depuis environ dix ans, l'arrivée de nouveaux satellites de télédétection a révolutionné notre connaissance des océans, mais aussi des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique (80 % en raison de l'orbite). Frédérique Rémy et son équipe du CNES travaillant sur les calottes polaires sont internationalement reconnues comme les plus performants.

En altimétrie, la complexité du milieu neigeux ne permet actuellement d'atteindre que la précision du mètre, contre quelques centimètres en océanographie. Le lancement l'an prochain du nouveau satellite européen ENVISAT et une amélioration des traitements accroîtront la précision d'un facteur 10 indispensable si l'on veut obtenir des bilans de masse, car ces calottes polaires sont des déserts avec des précipitations très faibles. D'ailleurs, il faudrait aussi obtenir une topographie du socle rocheux ou liquide!

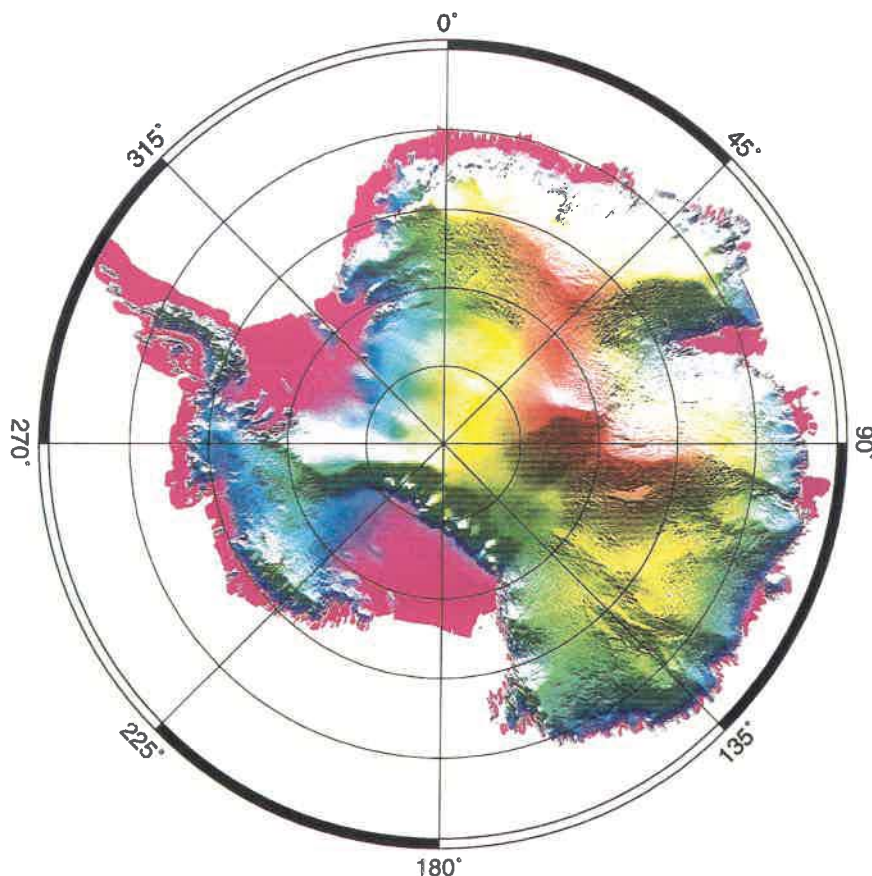
En glaciologie, d'autres équipements embarqués donnent une topographie dynamique, décrivant l'écoulement inégal de cette glace, soumise à des variables complexes. Depuis deux siècles, l'homme, à la recherche du développement agricole et industriel a inconsciemment modifié le climat de notre planète. Soudain, la recherche scientifique lui révèle les conséquences possibles; effrayé, aura-t-il le courage de prendre en temps voulu les mesures nécessaires pour éviter les drames économiques et humains?

Bertrand Imbert - Chef des expéditions polaires françaises en Antarctique pour l'AGI (1956-1958)



0 1000 2000 3000 4000 en m.

Topographie de l'Antarctique



Le continent antarctique

L'Antarctique est un continent dont le socle est presque entièrement recouvert de glace. Avec une surface de 14 millions de km² et une épaisseur moyenne de glace de 2200 m, pouvant dépasser 4000 m par endroit, ce continent représente 90 % de la glace terrestre et contient l'équivalent de 70 m du niveau d'eau des océans. Il reste encore, de nos jours, un continent peu connu et soumis à des mécanismes qui ne sont pas encore tous compris. C'est le continent le plus froid, le plus haut, le plus sec et le plus venté de la Terre. La température en surface décroît des côtes vers l'intérieur de -15 °C à -60 °C en moyenne. L'air froid et dense du centre dévale les pentes en créant des vents catabatiques, vents forts et persistants. À Dumont d'Urville, la vitesse moyenne du vent est de 40 km/h, le maximum pouvant atteindre 3 ou 4 fois cette valeur. Ces vents sculptent la surface de la calotte, de l'échelle centimétrique (microrugosité) à l'échelle métrique (sastruggi, dunes de neige créées par érosion de la surface), mais aussi déplacent localement une grande quantité de neige ou contribuent à des phénomènes d'érosion tels la sublimation.

En Antarctique, il ne neige que quelques centimètres par an à l'intérieur du continent et quelques dizaines de centimètres en zone côtière. Cela représente toutefois environ 2200 gigatonnes de neige déposées chaque année, soit l'équivalent de

6 mm du niveau des océans. La répartition spatiale et temporelle de l'accumulation de neige est relativement peu connue. Les modèles suggèrent une composante annuelle et une semi-annuelle alors que l'analyse fine des composantes annuelles et semi-annuelles du niveau de la mer peut s'expliquer parfaitement sans faire appel aux calottes polaires. Une des difficultés réside dans l'appréciation de l'écart entre les précipitations de neige, estimées par les modèles atmosphériques, et les taux d'accumulation effectifs, estimés in situ. L'écart entre les deux termes est dû à l'érosion, au dépôt ou au transport de la neige par le vent, ainsi qu'à la sublimation. Le rôle du vent sur la rugosité ou l'érosion, l'importance du transport de neige ou de l'érosion de la surface sont des processus encore mal compris.

L'ensemble de cette neige s'enfonce, se transforme en glace et s'écoule très lentement jusqu'à la côte où elle est évacuée sous forme d'iceberg (Figure 2). Les vitesses sont extrêmement faibles au centre, inférieures au m/an, et atteignent quelques 100 m/an dans certains glaciers émissaires. La neige tombée au centre de l'Antarctique met plusieurs centaines de milliers d'années avant de retourner à la mer. Ce long temps de résidence fait des calottes polaires les archives glaciaires de la terre. Les carottages de Vostok en Antarctique ou GRIP au Groenland permettent de remonter l'histoire climatique sur plusieurs cycles de transition entre période glaciaire et périodes interglaciaires. Les processus physiques qui permet-

tent à la glace de se déformer ou de glisser, le rôle des conditions limites à la côte ou l'effet des contraintes longitudinales (de traction ou de compression) sur la glace font l'objet de nombreuses controverses.

Ces chiffres, taux d'accumulation et de perte, sont actuellement évalués avec une faible précision, de l'ordre de 20 ou 30 %, ce qui entraîne beaucoup d'incertitudes sur son équilibre climatique. Pourtant, l'importance de son cycle annuel en terme de niveau des océans fait qu'une évolution de quelques % du bilan pourrait avoir des répercussions majeures sur le niveau de la mer. Les causes de déséquilibre sont si nombreuses et si incertaines qu'il est très difficile de les modéliser et de connaître même le signe du bilan de masse. En effet, autant les taux de précipitation ou l'évaporation suivent instantanément les variations climatiques, autant il faut des dizaines de milliers d'années pour qu'une fluctuation de température se propage vers la base de la glace et modifie de façon notable l'écoulement. La variation de volume en Antarctique est donc due à l'intégrale des différents effets des perturbations climatiques depuis environ 100 000 ans. Le cas de l'Antarctique de l'Ouest est encore plus complexe. En effet, son socle rocheux est en partie enfoncé par le poids de la glace sous le niveau de la mer et une part importante de l'écoulement met en jeu des fleuves de glace rapide s'écoulant vers des plates-formes de glace flottante, processus dont le temps de réponse aux variations climatiques est potentiellement plus court. La question de sa stabilité est régulièrement soulevée.

Si l'on veut un jour pouvoir prédire l'évolution des calottes et leur contribution au niveau des océans, il faut donc être non seulement capable d'estimer les variations de volume mais aussi d'en expliquer les causes. Pour comprendre, modéliser, prédire l'évolution des calottes polaires, exploiter les informations qu'elles contiennent, il est nécessaire de connaître les processus physiques, climatiques et dynamiques qui les contrôlent. La taille de ces continents, les difficultés d'accès, les conditions météorologiques rudes (vent et température), rendent difficiles les mesures in situ et font de la cartographie de l'Antarctique par les différents systèmes de télédétection un outil de prédilection (voir article de Christophe Podevin dans XYZ n° 77, 4^e trimestre 1998). Parmi les paramètres mesurables, la topographie de la surface est probablement l'un des plus déterminants : elle permet de contraindre les modèles d'évolution dynamique des calottes, de les tester, de les initialiser ou de mettre en évidence les processus physiques. Le suivi de la topographie permet d'estimer les variations de volume des calottes et leur contribution au niveau des océans.

Altimétrie satellite

L'altimétrie par satellite a été initialement conçue pour l'observation des océans. Le principe est simple : il s'agit de mesurer le temps aller-retour d'un signal émis à la verticale et réfléchi par la surface pour en déduire la distance entre le satellite et la surface. Une fois prise en compte l'orbite précise du satellite (la distance entre le satellite et une surface de référence), les délais de propagation des ondes à travers l'atmosphère et l'ionosphère, l'effet d'état de la mer, les biais instrumentaux et les marées terrestres et océaniques, la précision affichée de l'instrument, moyennée sur quelques kilomètres, approche le centimètre. Une telle précision de l'altimètre Topex-Poseidon permet, par exemple, d'estimer l'élévation du niveau de la mer avec une précision de 0,2 mm/an.

L'observation des surfaces terrestres et en particulier des calottes polaires présente des difficultés spécifiques liées à leur caractère accidenté et à la pénétration plus ou moins grande

des ondes dans le milieu. La pente de la surface observée décale la position du point de mesure par rapport à la zone visée. Les algorithmes de poursuite des radars altimètres ne sont pas adaptés au suivi précis des ondulations de la surface. À la longueur d'onde utilisée par l'altimètre (2,3 cm ou bande Ku), l'onde électromagnétique pénètre dans la neige très froide et sèche si bien que la réflexion ne provient pas uniquement de la surface mais des couches superficielles. Cette pénétration de l'onde dans le milieu induit un décalage entre le point d'observation et la surface physique. L'effet de la pénétration sur la restitution de la hauteur est d'autant plus complexe qu'il se combine à une surface naturelle plus ou moins rugueuse. Cette erreur est de loin la plus délicate à prendre en compte. En effet, difficilement estimable car la neige est un milieu très complexe, elle est probablement variable au cours du temps ou des saisons. Ceci rend imprécise l'interprétation des séries temporelles de mesure de hauteur des calottes car il faut corriger l'évolution de la hauteur des dérives de cette erreur liées aux changements d'état de la neige. En revanche, l'analyse de l'ensemble des observations altimétriques nous donne des informations sur les premiers mètres de neige, reliées plus ou moins directement aux taux d'accumulation, au régime des vents ou à la stratification, excellents indicateurs de l'évolution climatique actuelle.

En 1978, la NASA lançait le satellite altimétrique Seasat dont l'inclinaison de 72° permettait le survol de la moitié sud du Groenland et d'un secteur de l'Antarctique. En 1983, des Américains se servirent des mesures altimétriques de Seasat pour estimer la topographie des régions survolées par ce satellite. En 1991 le satellite européen ERS-1, embarquant un altimètre, a permis d'observer pour la première fois la topographie de surface de 80 % de l'Antarctique et de la totalité du Groenland. ERS-1 a été placé successivement sur des orbites survolant le même point tous les 3 jours ou tous les 35 jours, permettant l'étude locale de la variabilité à l'échelle météorologique ou saisonnière. D'avril 1994 à mars 1995, ERS-1 a été placé sur une orbite dite géodésique ne repassant jamais au-dessus d'un même point, apportant une excellente résolution spatiale : environ 30 millions de formes d'onde ont permis de cartographier la topographie de surface des calottes polaires avec une résolution de 2 km (figure 1). La précision de ces cartes, estimée par méthodes inverses ou par comparaison des mesures au point de croisement des orbites montantes et descendantes, est meilleure que le mètre dans les régions centrales. Elle peut cependant dépasser le mètre près de la côte, notamment à cause de la variabilité de la topographie et de la pente de la surface qui y sont plus fortes.

Topographie et dynamique de l'antarctique

La surface des calottes polaires est une surface libre. Du kilomètre à la centaine de kilomètres, le relief est très marqué par tous les processus dynamiques ou climatologiques, actuels et passés, qui en contrôlent l'évolution. La connaissance de la topographie permet de contraindre les modèles d'écoulement, d'estimer la rhéologie de la glace ou de décrire des mécanismes physiques présents, tant à l'échelle globale que locale. Même si certaines signatures de la topographie de surface ont été découvertes et partiellement expliquées il y a déjà plusieurs décennies à la suite des premières expéditions scientifiques l'altimétrie spatiale en permet de nos jours une description beaucoup plus fine.

Au premier ordre et à échelle globale, le relief des calottes est « quasi parabolique » comme tout corps plastique reposant sur

un socle: de la côte vers le centre, la hauteur augmente et la pente de surface diminue. Sur plus de 1 000 km, la pente est inférieure à quelques m. par km. À cette échelle, le relief est essentiellement contrôlé par la distance à la côte. Il reflète l'équilibre entre précipitations neigeuses et évacuation de la glace et dépend, par conséquent, des conditions climatiques et des lois de la dynamique. La glace s'écoule dans la direction de la plus grande pente. La topographie nous permet donc d'estimer les vitesses d'écoulement. Celles-ci sont inférieures à 1 m/an près des dômes et le long des lignes de séparation des bassins, et atteignent 100 m/an au bord. On observe des chenaux d'écoulement rapide dont l'effet se fait sentir jusqu'à plusieurs centaines de km à l'intérieur du continent. L'observation de la situation sur l'ensemble du pourtour Antarctique fait apparaître que 80 % des glaces transitent par seulement 20 % des côtes.

Une analyse précise de la topographie permet aussi de visualiser le drainage de la glace: la figure 3 représente l'anomalie de hauteur dans le sens perpendiculaire à la direction de l'écoulement, estimée en calculant la courbure de la topographie dans cette direction à l'échelle de 100 km. À la côte, cette valeur est étroitement contrôlée par les vallées observées du socle rocheux, ce qui suggère que ces anomalies ont leur cause près de la côte et traduisent l'existence de glaciers émissaires rapides ou lents. Cette anomalie se transmet jusqu'à l'intérieur du continent, suggérant la direction du drainage et des lignes d'écoulement. On peut ainsi établir que la vitesse de chaque chenal et donc la topographie à l'échelle globale est aussi contrôlée par les vitesses d'écoulement des glaciers émissaires: Les lignes bleues d'écoulement rapide sont légèrement concaves et par conséquent plus basses que les lignes jaunes d'écoulement lent. Ceci permet de séparer visuellement les différents bassins de drainage. On peut ainsi imaginer que le niveau de la mer qui affecte la vitesse d'écoulement des émissaires à la périphérie, a un effet sur la forme de toute la calotte. Enfin, on peut aussi constater que le long de la côte,

les chenaux lents et rapides alternent de façon régulière, avec une longueur d'onde de 250 km, ce qui est interprété comme un effet de rétroaction complexe entre les vitesses des glaciers et l'érosion du socle rocheux.

Aussi, la région de Vostok, où se situe le carottage Russe permettant l'analyse de près de 460 000 ans d'archives glaciaires (figure 4) est assez reconnaissable par un plateau de près de 250 km de long sur quelques dizaines de km de large. À cet endroit, la fonte de la glace basale engendre du glissement: il y a donc un relâchement des contraintes qui se traduit par une diminution de la pente de la surface. Ce plateau est entouré d'un bourrelet qui pourrait être expliqué par les contraintes longitudinales induites par la transition entre déformation et glissement, lesquelles peuvent ainsi être mieux décrites.

Conclusion

Beaucoup de signatures de la topographie de surface des calottes restent inexplicables et contiennent encore matière à améliorer notre connaissance de l'écoulement des calottes. En 2001, l'Agence Spatiale Européenne lancera la plate-forme ENVISAT dont l'altimètre a pour tâche d'assurer la continuité des observations des satellites ERS1 et ERS2. L'Agence Spatiale Européenne vient également de décider la mission CRYOSAT, dédiée à l'étude des glaces continentales et aux glaces de mer. La NASA, quant à elle, lancera en 2001 le satellite ICESAT embarquant un altimètre laser, qui devrait cartographier de façon exacte la surface des calottes polaires avec une résolution horizontale exceptionnellement fine de 20 m et une précision sur la hauteur de quelques cm. L'apport de ces missions devrait totalement révolutionner nos connaissances sur la dynamique des calottes polaires et leur contribution sur l'évolution du climat de la Terre.

frederique.remy@cnes.fr

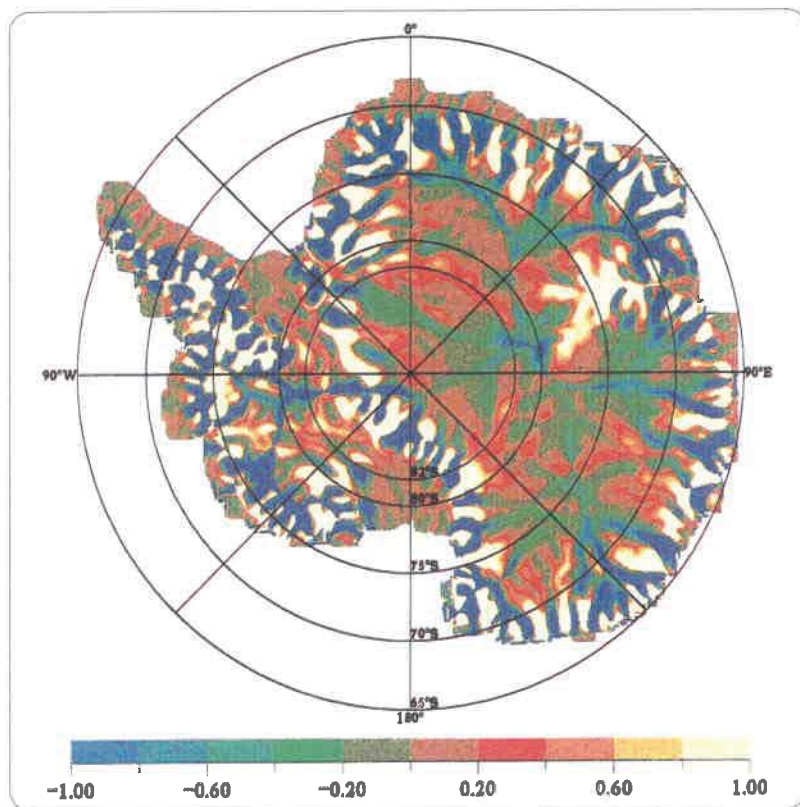


Figure 3 - Anomalie de hauteur perpendiculaire à l'écoulement, en mètre, estimée à partir de la courbure sur 100 km dans cette direction. Les chenaux jaunes correspondent à des chenaux lents, les chenaux bleus correspondent à des chenaux rapides.

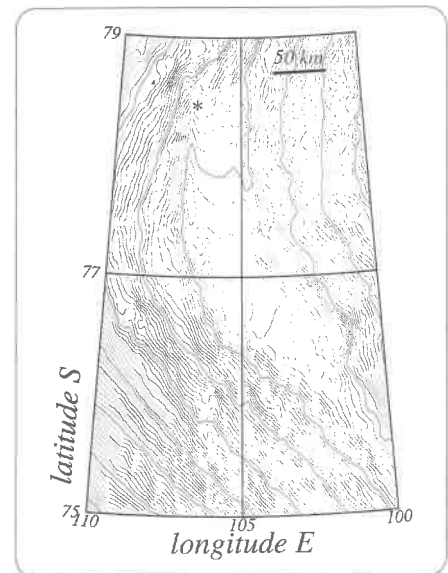


Figure 4 - Topographie de la région de Vostok. L'étoile situe le carottage (78,5°S, 106,8°E). La présence d'un lac à plus de 3 500 m de profondeur provoque du glissement qui se traduit en surface par un relâchement des contraintes donc à une diminution de la pente. On peut observer un bourrelet entourant le lac qui est la marque de la transition brusque entre glissement et déformation.