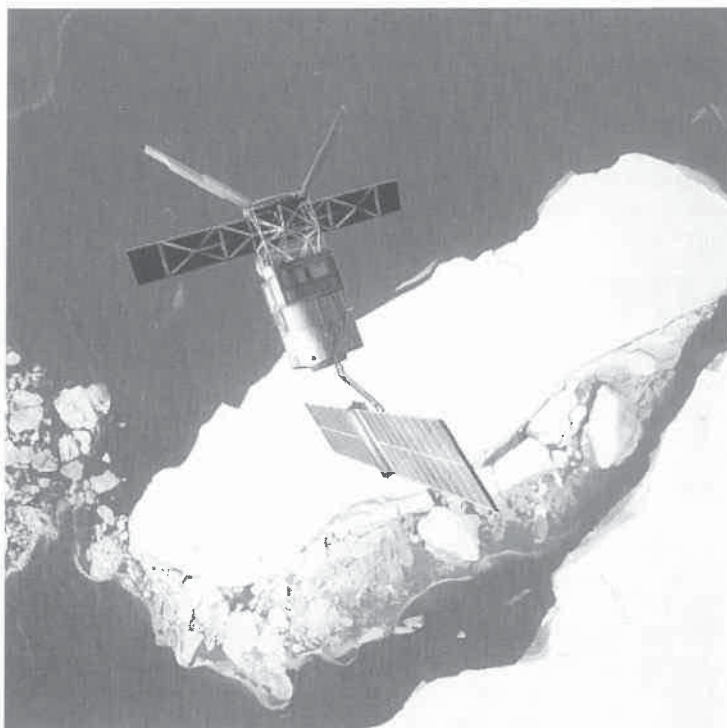


Le programme des études de l'École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT) comprend notamment un module de télédétection, enseigné par M. Laurent Polidori (Aérospatiale). Dans le cadre de ces cours, les élèves sont amenés à produire un travail, les sujets étant aussi nombreux que variés, tous ayant pour dénominateur commun la télédétection d'une part, et les applications de cette technique liées à la topographie et à la cartographie. Cet article a pour objet de résumer l'un d'entre eux, réalisé en 1997, qui traitait de la cartographie de l'Antarctique. L'un des intérêts de présenter ici cet exercice d'étudiant réside dans le fait que l'essentiel du travail a consisté à faire le point sur l'aptitude des systèmes de télédétection à cartographier l'Antarctique, le dernier des continents, et non le moins intéressant. Des équipes de chercheurs, expertes en la matière, travaillent actuellement sur ces thèmes (voir postface ci-après de Frédérique Rémy). Rappelons simplement que les méthodes et les moyens ont bien évolué depuis cinquante ans, quand les premiers membres des Expéditions Polaires Françaises menaient à bien la cartographie de la Terre Adélie (voir article de Yves Vallette dans XYZ n° 65, 4^e trimestre 1995).

Aptitude des systèmes de télédétection à cartographier l'Antarctique

Christophe Podevin – Ingénieur ESGT



ERS survolant les glaces de l'Antarctique

PRÉFACE

Le continent antarctique est moins connu que la face éclairée de la lune !... C'est ce qu'écrivait en 1946 le Contre Amiral Richard E. Byrd.

La péninsule antarctique, située au Sud de l'Amérique, a été reconnue assez tôt et bien cartographiée au début du siècle, en particulier par les missions du Commandant J.-B. Charcot.

Mais l'autre région antarctique, qu'on appelle maintenant antarctique de l'Est, et qui nous est chère car découverte par Dumont d'Urville en 1840, est restée longtemps très peu connue.

En 1911 et 1912, les raids de Douglas Mawson ont complété la cartographie avec les moyens de l'époque : leviers sous voiles, visées au cercle et au théodolite.

Ce sont les couvertures de photos aériennes de l'expédition High Jump qui permettent une bonne connaissance de la surface. Comme indiqués dans les numéros 65 et 66 de la revue, les cartes au 1/100 000 de la Terre Adélie ont été éditées par l'I.G.N. par restitution de ces photos, avec des points au sol déterminés par des stations à l'astrolabe ou au théodolite.

Ces cartes fournissent un bon tracé de la côte et de ses quelques points rocheux mais cette côte est très variable dans les zones de falaises de glace ou de langues des glaciers.

En altimétrie, tout reste à faire car des cheminement ont bien été déterminés mais sur une surface de glace qui est mobile en altitude et en plan.

Il faut bien se rappeler que la glace **recouvre 98 % de ce continent** ! Il fallait donc trouver des méthodes applicables à cette surface qui bouge. Il est donc passionnant, pour ceux qui ont peiné, dans des conditions extrêmes, avec théodolites, astrolabes ou altimètres, de voir arriver les nouvelles méthodes comme celles bien décrites par **Frédérique Rémy**, du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale. Il est très attachant de voir qu'un jeune élève de l'École Supérieure des Géomètres et Topographes, Christophe Podevin, présente un remarquable travail sur **l'Aptitude des systèmes de télédétection à cartographier l'antarctique**. Que de progrès dans les méthodes de recherches, depuis 100 ans, puis depuis 50 ans et encore plus depuis ces dernières années !...

Yves Vallette

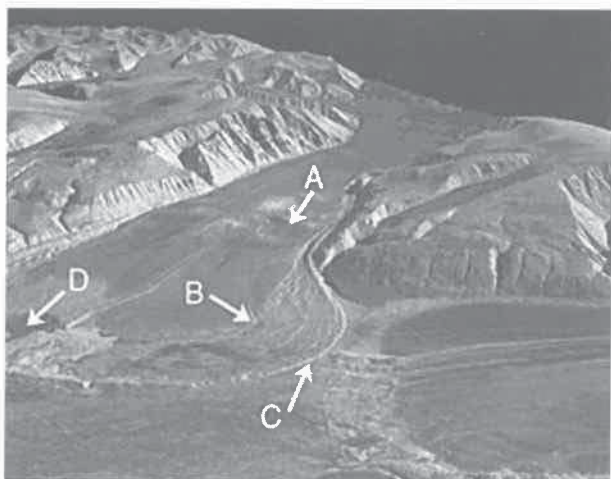
Les premiers

Seasat fut le premier satellite dédié à la cartographie des glaces polaires. Malheureusement, lancé le 26 juin 1978, il ne fut seulement en service que jusqu'au 10 octobre 1978. Il y eut aussi Geosat ou encore Landsat, mais ces missions sont désormais achevées.

ERS

ERS (*European Remote Sensing Satellite* ou satellite européen de télédétection) est un programme qui comprend deux satellites exploités par l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Ils réalisent des mesures portant sur les mers, les vents et les vagues, ainsi que les terres émergées et notamment les calottes polaires. La tâche d'ERS-1, lancé le 17 juillet 1991, est poursuivie par ERS-2, lancé le 21 avril 1995. À quelques différences près, ERS-2 est pratiquement le double d'ERS-1. Placés en orbites héliosynchrones à 785 km d'altitude environ, avec une inclinaison de 98.52°, ils effectuent un peu plus de 14 orbites par jour et un cycle en 35 jours.

Pendant quelques mois, ERS-1 et ERS-2 ont fonctionné en tandem, constituant pour les utilisateurs un duo attrayant en matière d'interférométrie radar. Cette technique nouvelle, encore théorique avant le lancement d'ERS-1, permet d'obtenir des renseignements extrêmement précis sur la topographie de la surface terrestre grâce aux informations de deux ou plusieurs images prises lors de passages successifs du satellite au-dessus d'une même région. La qualité des résultats tient surtout de l'intervalle de temps séparant deux survols consécutifs, et à l'écart séparant les orbites successives. Avec ERS-1 et ERS-2 en tandem, ces paramètres ont ainsi pu être grandement optimisés. ERS-2 est en effet placé sur une orbite soigneusement phasée par rapport à l'orbite identique d'ERS-1.



Mouvements et déplacements de glaciers
d'après des données de ERS

Dans l'Arctique, ERS-1 est à l'origine de la carte topographique du Groenland la plus précise qui existe. Avec l'interférométrie SAR d'ERS, le traitement des données permet d'établir des cartes topographiques tridimensionnelles de la Terre, montrant par exemple l'écoulement d'un glacier. La mesure de la vitesse et du mouvement des glaciers répond à un besoin crucial des climatologues et géographes. Une équipe de l'Université d'Alaska avait mesuré la vitesse de déplacement du gla-

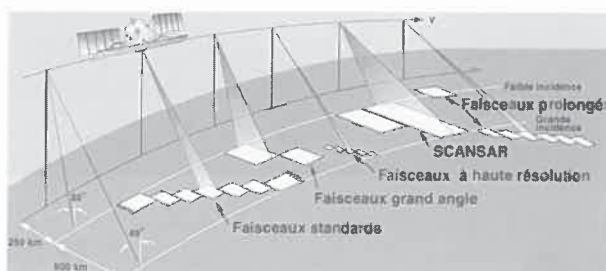
cier de Bering à l'aide d'un interférogramme, puis avait comparé les valeurs trouvées à celles issues de mesures indépendantes faites par GPS. Les résultats très voisins ont mis en évidence l'efficacité de la méthode et permis de la valider. Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) qui en sont issus sont de précieux produits cartographiques pour les scientifiques.

Les satellites ERS comportent plusieurs instruments, dont deux nous intéressent plus particulièrement ici : l'AMI (*Active Microwave Instrument*) et le RA (*Radar Altimeter*). L'AMI est un instrument hyperfréquence actif, composé d'un SAR et d'un radar doppler, nommé SCATT. Le SAR fournit notamment des images des calottes polaires, avec une résolution meilleure que 30 m, dans un couloir de 99 km de large et avec une incidence de 23°. On obtient des données relatives à l'observation de l'Antarctique plusieurs fois par jour sous un angle variable, en site et en incidence. Le RA est un altimètre radar qui mesure notamment la distance séparant le satellite de la surface du sol. Le RA peut déterminer la topographie de la calotte glaciaire, le type de glace et les frontières entre mer et glaces. Il est d'une utilité primordiale dans ce contexte. Ses mesures donnent des indications précieuses sur la modification de l'équilibre de masse de la calotte glaciaire en fonction du climat.

Le satellite européen ENVISAT, qui devrait être lancé en 1999, prendra la relève des satellites ERS.

RADARSAT

RADARSAT est le premier satellite canadien d'observation de la Terre. Lancé le 4 novembre 1995, il sera normalement exploitable jusqu'à l'aube du prochain millénaire. Il s'agit d'une mission de coopération entre l'Agence Spatiale Canadienne (ASC) et la NASA notamment. Parmi les objectifs de la mission figurent la cartographie de l'Antarctique et la surveillance de la couverture glacielle des mers à des fins de recherche climatique. Placé en orbite héliosynchrone crépusculaire à 798 km d'altitude environ, avec une inclinaison de 98.6°, il effectue 14 orbites par jour et un cycle en 24 jours. Du fait de son inclinaison, voisine de celle d'ERS, en visant à droite, la couverture du pôle Nord est assurée, mais le pôle Sud ne peut ainsi être couvert. On ne dispose alors d'aucune donnée satellitaire concernant la zone circulaire comprise au Sud du parallèle $\phi = 81.48^\circ$ S ; c'est donc une zone d'environ 4 millions de km² qui ne peut ainsi pas être cartographiée. L'ASC a donc conçu RADARSAT de façon à ce qu'il puisse viser aussi à gauche, ce qui lui permet de couvrir ainsi la totalité du globe terrestre. Grâce à cette caractéristique, l'objectif de l'acquisition d'une cartographie globale et détaillée de l'Antarctique sera atteint, et ce, pour la première fois.



Modes de fonctionnement du SAR de RADARSAT

Le SAR est conçu de manière à ce que son faisceau soit orienté à des angles d'incidence allant de 10 à 60 degrés, dans une largeur de fauchée variant de 50 à 500 kilomètres. Il peut fournir, selon le mode utilisé, des images de résolution spatiale comprise entre 10 et 100 mètres. Concernant la cartographie de l'Antarctique, il faut savoir que la couverture du continent peut être réalisée en une seule journée lorsque son faisceau couvre une fauchée de 500 kilomètres. Le SAR peut pénétrer certains types de couverture des terres, comme les couches de neige fraîche dans les régions polaires. C'est un aspect intéressant pour distinguer les différentes couches de glaces et de neiges sur le continent.

JERS-1

Pour élargir le champ de description des satellites concernés, on peut citer le premier satellite japonais d'observation de la Terre, JERS (Japoneses Earth Ressource Satellite), lancé en 1992, comportant un SAR et un capteur optique. Le SAR a une résolution spatiale de 18 mètres. Placé en orbite héliosynchrone à 568 km d'altitude environ, avec une inclinaison de 97.67° et un cycle orbital de 35 jours, les applications de JERS sont sensiblement les mêmes que ses confrères.

ENJEUX

L'Antarctique, par la masse de glace qu'il constitue, est un gigantesque réservoir d'eau. Pour s'en rendre compte, il faut imaginer que si tout ce « glaçon » venait à fondre, par un grand malheur bien improbable, le niveau moyen des océans viendrait à monter de plus de 60 mètres. Or, du fait de sa taille, des difficultés d'accès, des conditions de séjour et de travail difficiles, mais aussi du milieu très particulier et spécifique qu'il représente, l'Antarctique est encore mal connu. Cependant, les tech-

niques spatiales vont permettre de réaliser certaines tâches qui, avant leur contribution, auraient semblé tout à fait irréalisables. La télédétection satellitaire permet actuellement d'accomplir d'énormes progrès de compréhension et de connaissances dans les mécanismes et l'évolution des calottes, car elle permet d'accéder à des observations globales, répétées et précises. Ces observations permettent ainsi de comprendre, de modéliser et de prédire l'évolution des calottes, qui représentent un élément important en matière de climatologie, car elles sont à la fois les archives glaciaires de la Terre permettant de remonter jusqu'à plusieurs cycles glaciaires (soit plusieurs centaines de milliers d'années) et un témoin de l'évolution climatique actuelle.

Or, il est important d'être capable d'anticiper les conséquences de changements de climats. En effet, en ce qui concerne l'Antarctique, la fonte des glaces côtières influe sur le niveau des océans terrestres, sur leur salinité et la température de leurs eaux. Un changement de climat sensible entraînerait des perturbations de notre équilibre non négligeables. D'un autre côté, en ce qui concerne les régions montagneuses, l'eau présente sous forme de glaces constitue l'une des richesses importantes de ces régions (alimentation, cultures, production d'électricité, etc.). La fonte des glaciers, due à des changements climatiques, est une composante cruciale du cycle hydrologique des zones alpines, qui peut influencer fortement sur l'économie et la vie de ces régions. Les connaissances et modélisations acquises par l'étude de l'Antarctique peuvent donc s'avérer fort utiles à un niveau plus local.

Voilà autant de raisons qui font l'intérêt de l'étude des glaces et des milieux polaires en particulier, car les conditions extrêmes de l'Antarctique reflètent à grande échelle les phénomènes plus petits des régions alpines par exemple.

Bibliographie concernant la télédétection

- Agence Spatiale Européenne (ESA), *⇒ Application Achievements of ERS-1 (New Views of the Earth)*; *⇒ ERS User Handbook*; *⇒ ERS-1 System*; *⇒ ERS-2 : a continuation of the ERS-1 success*; *⇒ Remote Sensing of the Polar Environments*; *⇒ Scientific Achievements of ERS-1 (New Views of the Earth)*.
- Bamber J., *⇒ A digital elevation model of the Antarctica ice sheet derived from ERS-1 altimeter data and comparison with terrestrial measurements*, article de 1994 dans *Annals of Glaciology*, vol. 20, pp. 48-54.
- Drinkwater M.R., *⇒ Imagerie des glaces de l'Antarctique au moyen du diffusiomètre d'ERS-1 à résolution améliorée*, article de 1994, *Observation de la Terre*, pp. 4-6.
- Hartl P., *⇒ Application de l'interférométrie du SAR d'ERS-1 dans l'Antarctique*, 1994, *Observation de la Terre*, n° 43, pp. 1-4.
- Legrésy B., *⇒ Télédétection des calottes polaires par altimétrie satellitaire : application à la climatologie et au bilan de masse de l'Antarctique*, thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier (Toulouse III), Glaciologie et télédétection, 1998.
- Matassa, Higginson, Mayer, Herzfeld, *⇒ New results from mapping Antarctica at high resolution from radar altimeter data*, 1996.
- Oehmichen J-P., *⇒ Étapes et techniques de l'astronautique*, Bordas, 256 p., 1993.
- Podevin C., *⇒ Cartographie de l'Antarctique par télédétection, écrit d'étudiant sur la télédétection*, 34 p., ESGT, 1996.

- Polidori L., *⇒ Cartographie Radar*, Coll. l'Univers de la télédétection, Éditions Gordon and Breach Science Publishers, 1997.

- Rémy F., *⇒ Observation des calottes polaires Antarctique et Groenland par techniques spatiales*, texte de conférence, 1997.

Bibliographie concernant l'Antarctique

- Etienne J-L., *⇒ Antarctica, une aventure dans les mers australes*; *⇒ Expédition Erebus*; *⇒ Les pôles*; *⇒ Transantarctica*, 1990.
- Imbert B., *⇒ Le grand défi des pôles*.
- Lorius C., *⇒ Glaces de l'Antarctique, une mémoire, des passions*.
- Shackleton E., *⇒ Au cœur de l'Antarctique, 1911*; *⇒ L'odyssée de l'endurance*.
- Vallette Y., *⇒ Ceux de Port-Martin, Pionniers de Terre Adélie*.
- Victor P-E., *⇒ Planète Antarctique*.

7 Quelques sites web intéressants

- ⇒ <http://radarsat.space.gc.ca>
- ⇒ <http://radarsatinternational.www.rsi.ca>
- ⇒ <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/radarsat>
- ⇒ <http://services.esrin.esa.it>
- ⇒ <http://www.estec.esa.nl>
- ⇒ <http://www.esrin.esa.it>

Postface

**topographie
de surface**

**antarctique
et groenland**

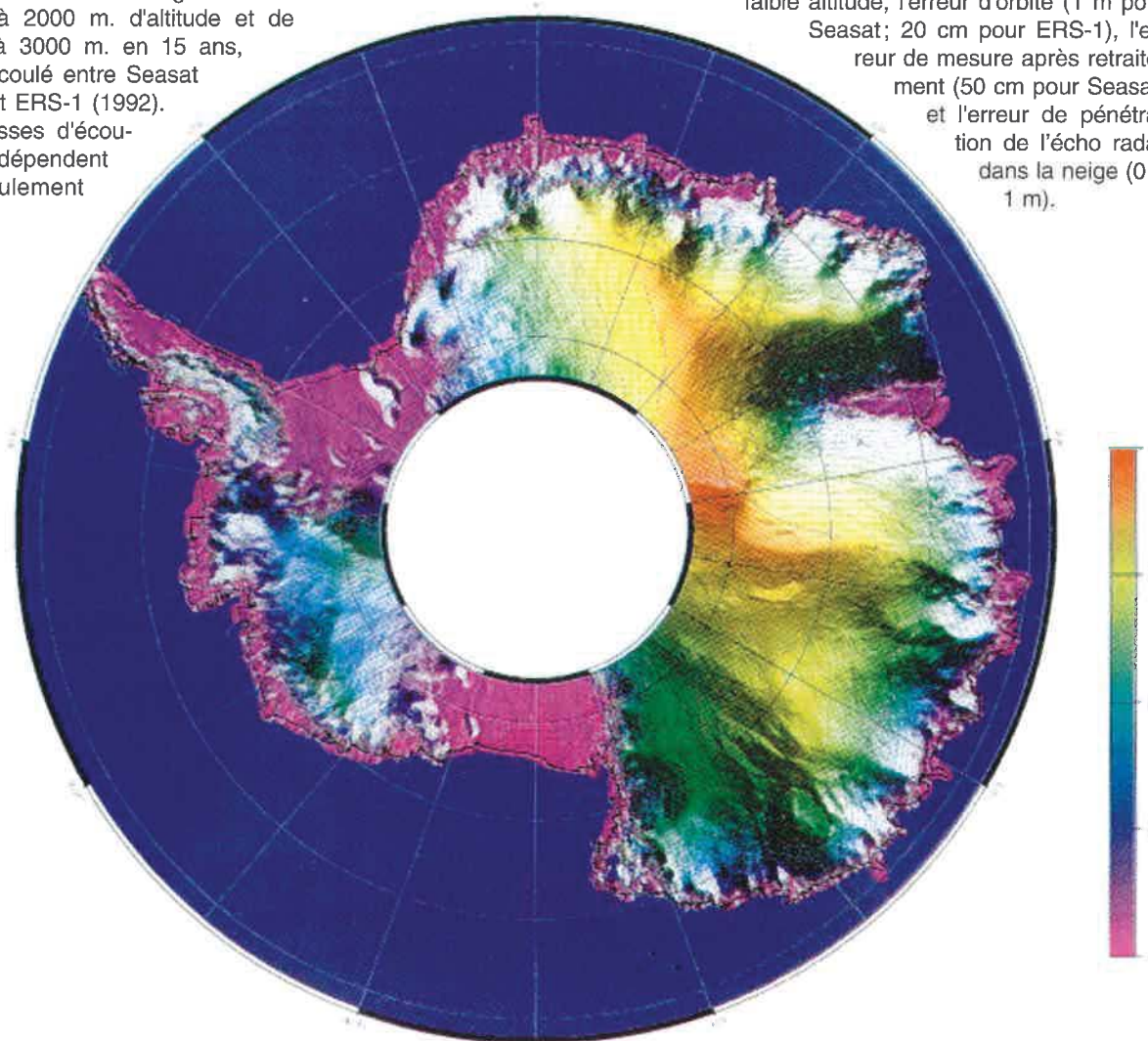
Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale – (GRGS) – Frédérique Rémy

POURQUOI LA TOPOGRAPHIE, À QUOI ÇA SERT ?

La topographie de surface a un rôle unique : d'un point de vue climatique, seules des mesures répétées de la topographie de surface peuvent estimer le bilan de masse actuel de l'Antarctique. D'un point de vue dynamique, elle est à la fois le résultat de l'évolution passée et la condition initiale de l'évolution future. Elle peut servir aussi bien à tester les modèles, à les contraindre ou à les initialiser, ou à mettre en évidence des processus physiques qui jouent un rôle. Quel que soit l'objectif, la précision doit être la meilleure possible et s'approcher de la dizaine de cm. Une variation des taux d'accumulation, de l'ordre de 10 %, conduirait à un signal de l'ordre de 30 cm à 2000 m. d'altitude et de 15 cm à 3000 m. en 15 ans, temps écoulé entre Seasat (1978) et ERS-1 (1992). Les vitesses d'écoulement dépendent non seulement

de la contrainte mécanique appliquée, donc de la pente de la surface sur une échelle d'une dizaine de kilomètres, mais aussi du chemin suivi depuis le dôme, c'est-à-dire de la courbure de la surface. Les pentes moyennes étant de l'ordre de 1/1000, une précision de 15 cm sur la topographie de surface fournit la pente à une précision de 3 %. Si, par ailleurs, les vitesses d'écoulement dépendent du cube de la pente de la surface, comme il est admis, cette précision fournira les vitesses d'écoulement à 10 % près.

Cependant, la précision altimétrique brute est 10 à 20 fois moins bonne que celle souhaitée. En effet, il existe quatre sources d'erreur majeures : l'erreur de pente (0 à 15 m), dominante surtout dans les zones de plus faible altitude, l'erreur d'orbite (1 m pour Seasat; 20 cm pour ERS-1), l'erreur de mesure après retraitement (50 cm pour Seasat) et l'erreur de pénétration de l'écho radar dans la neige (0 à 1 m).



Topographie de l'Antarctique, donnant une idée très précise de l'altimétrie du continent, du niveau de la mer jusqu'à plus de 4000 m (le Mt Winston culmine à 4897 m) (altimétrie radar du satellite ERS, avec une résolution de 1/30", par le GRGS).

TRAITEMENT ALTIMÉTRIQUE

La mesure altimétrique est extraite à partir des formes d'ondes (toutes les 0.05 s ou 350 m le long de la trace du satellite). Elle est ensuite corrigée de l'erreur de troposphère sèche à partir d'une relation théorique reliant l'altitude et la pression atmosphérique. Le signal de marée solide est également soustrait. L'erreur de troposphère humide et l'erreur ionosphérique, négligeables devant les autres erreurs, ne sont pas corrigées. L'orbite utilisée est l'orbite précise calculée par l'Université de Delft. L'erreur résiduelle sur cette mesure est, après corrections, de l'ordre du mètre (entre 80 cm et 1 m d'écart type aux points de croisement des traces du satellite).

La topographie haute résolution est construite à partir du cycle géodésique, très dense (répétitivité 2 fois 168 jours). Respectivement, 30 millions de formes d'onde et 2 millions de formes d'onde, ont été utilisées pour les topographies au 1/30° de l'Antarctique et du Groenland. L'erreur d'orbite est retirée après ajustement d'une constante et d'un biais, obtenus par minimisation de la différence d'élévation aux points de croisement. L'erreur de hauteur liée à la pente de la surface est corrigée après la construction de la carte, en estimant en chaque pas de grille la pente à partir d'une forme biquadratique ajustée sur 9 pas, et en tenant compte de la pente et de la courbure de la surface. L'erreur finale peut dépasser plusieurs mètres au bord de la calotte, ceci à cause de la pente de la surface et de la présence d'ondulations importantes, mais est inférieure au mètre dans les régions intérieures.

DESCRIPTION

Les détails obtenus à partir de l'orbite dense sont surprenants. Par exemple, sur un agrandissement de la Terre Adélie, nous voyons la signature du lac de Vostok (95°E, 72-76°S) : la glace glisse à cause de la présence d'eau subglaciaire, il y a donc un fort relâchement local des contraintes d'écoulement dont la signature se reflète en surface. La même signature est observée près de l'Astrolabe (68°S, 140°E), lac subglaciaire entouré de chaînes de montagnes. Ces lacs sont entourés de bour-

relets causés par les transitions brusques frottement fort/frottement faible. En revanche, à gauche de l'axe Dumont d'Urville/dôme C, nous voyons la marque d'une forte contrainte causée par le passage de la glace sur une chaîne de montagnes.

Au premier ordre, et à grande échelle, 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. À cette échelle, le relief est contrôlé par l'équilibre entre précipitation et évacuation, et dépend par conséquent des conditions climatiques. Si l'on retranche ce profil quasi-parabolique du profil réel, apparaissent alors d'autres signaux. À l'échelle de la centaine de kilomètres, on découvre un double réseau de structures variant de 20 m d'amplitude à la côte à quelques dizaines de centimètres au centre ; l'un, orienté perpendiculairement aux lignes de niveau, l'autre, parallèlement. Ce premier réseau traduirait des anomalies d'écoulement entre chenaux attenants qui se transmettent de la côte aux dômes. Une partie de la forme des calottes serait donc contrôlée par la vitesse d'écoulement des glaciers émissaires. À l'échelle de la dizaine de kilomètres, nous observons des ondulations extrêmement régulières de 20 km de longueur d'onde et d'amplitude 5 m, très caractéristiques de la topographie des deux calottes polaires. Ces ondulations, plus fortes aux bords et plus faibles à l'intérieur des continents, seraient dues à la présence du socle rocheux amorti par l'épaisseur de glace. Elles sont statistiquement inclinées de 45° par rapport aux lignes d'écoulement.

Ces différentes signatures, qu'elles soient liées à la dynamique ou la climatologie, permettent de quantifier les processus physiques connus qui agissent au Groenland ou en Antarctique, ou d'en découvrir. C'est le cas de l'alternance des lignes d'écoulement rapide et des lignes d'écoulement lent qui se fait à une longueur d'onde caractéristique d'environ 250 km, ou encore du réseau de structures parallèles aux lignes de niveau qui restent encore à expliquer.

Frédérique Rémy, GRGS
(Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale)
e-mail : frederique.remy@cnes.fr

Association Française de Topographie **ADHEREZ**

Pour le contact permanent avec la profession, la prise directe avec la science et la technique du métier. Pour se situer dans la topographie dont l'université est probante. L'une des solutions est d'adhérer à l'AFT.

L'AFT est le lieu géométrique où se rencontrent les grands organismes de la topographie, le cadastre, le Service Hydrographique, l'IGN... les grands Ecoles de la profession, l'ENSAIS, l'ENSG, l'ESTP, l'ENC... les hommes et les femmes des grandes Ecoles de la Nation, Polytechnique, Centrale... et aussi tous les ingénieurs, techniciens, hommes de terrain, qui font chaque jour le tissu expérimenté d'un métier que l'AFT a pour vocation de faire partager par tous, en promouvant la solidarité professionnelle.