> Extrait du *Spot Magazine* / Magazine international de Spot Image / Janvier 2008 / n° 43

www.spotimage.fr

SPOT IMAGE

Remerciement E. Berthier / M. Hambrey

LES SATELLITES AU CHEVET DES GLACIERS DE MONTAGNE

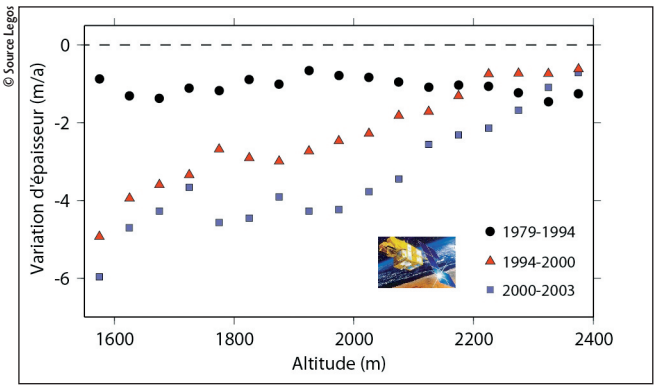
Les glaciers constituent l'un des témoins les plus spectaculaires de l'évolution climatique récente. Paradoxalement, ils restent peu étudiés car ils sont éparpillés à la surface de la Terre et sont difficiles d'accès. Aujourd'hui, les images satellitaires optiques couplées à des traitements originaux sont utilisées par les glaciologues pour dresser un constat alarmant de leur évolution récente.

Témoins et acteurs du réchauffement climatique

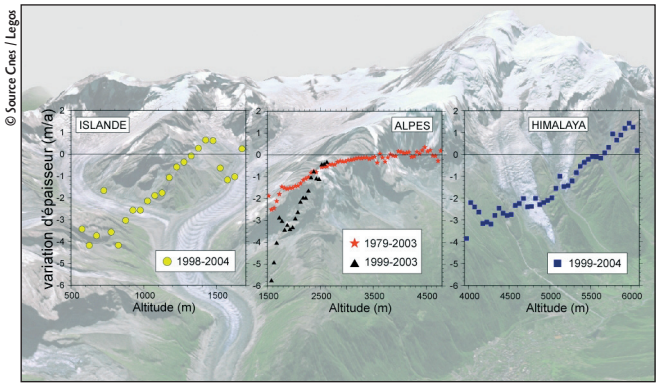
Leur déclin rapide fait des glaciers de montagne un acteur important et un indicateur précieux des altérations climatiques. Même si la surface cumulée de tous ces glaciers (cette définition exclue les calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique) excède à peine celle de la France (~680000 km²), ils fondent si vite depuis 10 ans qu'à l'échelle globale, ils contribuent au tiers (soit ~1 mm/an) de la hausse totale du niveau moyen des mers (~3 mm/an). Localement, les glaciers jouent un rôle régulateur du régime des rivières en stockant l'eau à l'état solide durant la saison humide et en la restituant sous forme liquide durant la saison sèche. Ils soutiennent ainsi les débits d'étiages des cours d'eau et leur présence est donc cruciale pour la ressource en eau (irrigation des cultures, micro-centrales électriques, boisson) des populations des vallées de montagne. Mais pourront-ils assurer ce rôle à l'avenir? Enfin, l'état de santé des glaciers de montagne, présents à toutes les latitudes et à diverses altitudes, constitue un excellent indicateur des fluctuations climatiques. Ils sont révélateurs des évolutions des températures et des précipitations dans des régions où les mesures météorologiques sont rares et peu homogènes. Autant d'enjeux qui invitent à un suivi attentif de ces témoins et acteurs du réchauffement global.

Toutefois, notre connaissance de l'évolution et du fonctionnement de ces glaciers demeure fragmentaire et limitée par le manque d'observations. Les mesures in situ sont rendues délicates par les conditions climatiques propres à l'environnement de haute montagne (tempêtes de neige, froid, crevasses nombreuses, risques d'avalanche). Pour ces raisons, parmi 160 000 glaciers disséminés à la surface du globe, seule une cinquantaine (de petite taille et les plus faciles d'accès) est régulièrement visitée sur le terrain par les glaciologues. Pour obtenir des observations à l'échelle globale et pouvoir étudier les plus grands glaciers, l'outil satellitaire semble évidemment une réponse adaptée. Mais son utilisation est rendue difficile par l'hétérogénéité des objets étudiés (de quelques centaines de m² à quelques milliers de km²) et la forte topographie de ces zones. De plus, l'état de surface glaciaire évolue très rapidement (en quelques jours) en raison des chutes de neige ou de la fonte. Du coup, la perte de cohérence (ou de corrélation) est fréquente lorsqu'on compare deux acquisitions satellitaires. Enfin, les glaciers, couverts de neige ou de glace, ont un fort albédo et réfléchissent donc la plus grande partie du rayonnement vers l'espace, ce qui sature les images si les gains instrumentaux ne sont pas ajustés au préalable.

>>>



Variation de l'épaisseur de la Mer de Glace (Massif du Mont-Blanc). Si de 1979 à 1994, on note des pertes d'épaisseur à peu près constantes quelle que soit l'altitude, les 2 périodes qui suivent, 1994-2000 puis 2000-2003, démontrent une accélération des pertes de glace, principalement en zone d'ablation, soit dans les zones les plus proches du front du glacier.



Variation des épaisseurs (en mètre par an) des glaciers islandais, alpins et himalayens. Les pertes sont similaires et fortes à basse altitude alors qu'elles sont limitées dans la zone d'accumulation à haute altitude.

>>> Les difficultés sont donc nombreuses mais peuvent être levées par une définition minutieuse des conditions géométriques et radiométriques des acquisitions satellitaires et par des post-traitements adaptés au contexte de haute montagne. Aujourd'hui, des images optiques haute résolution (du satellite Spot 5 notamment) nous permettent de mesurer deux variables clefs des glaciers: leurs vitesses de surface et leurs variations de volume. Le massif du Mont-Blanc constitue un site de choix pour confronter ces méthodologies novatrices avec les campagnes de terrain du laboratoire de glaciologie de Grenoble (LGGE). Grâce à cette vérité terrain, les méthodes sont validées et peuvent être appliquées à des sites plus difficiles d'accès comme les calottes glaciaires islandaises, les glaciers de l'Himalaya indien ou les régions polaires.

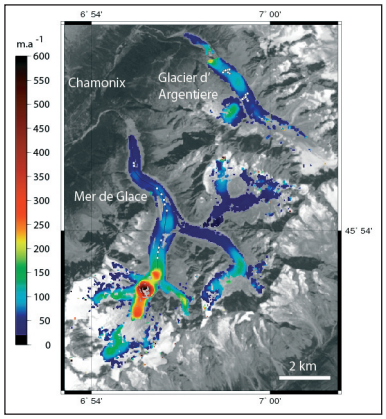
Mesurer les évolutions des volumes de glace et la dynamique des glaciers depuis l'espace

Un premier paramètre important est l'évolution des volumes de glace. Des topographies précises, déduites de couples stéréoscopiques Spot pour des années différentes, sont comparées pour estimer les variations d'épaisseur de glace. Au préalable, il a fallu soigneusement ajuster ces différents modèles numériques de terrain (MNT) sur les zones rocheuses et stables qui entourent les glaciers. Nos mesures dans le massif du Mont-Blanc, couvrant les périodes 1979-1994, 1994-2000 et 2000-2003, sont comparées aux relevés in situ, indiquant une précision de ± 1 à 2 m. Une accélération nette de l'amincissement à basse altitude est observée lors des 10 dernières années alors qu'aucune tendance significative n'apparaît au-dessus de 3 000 m. Ainsi, en face de la gare du Montenvers (arrivée du petit train qui monte depuis Chamonix) vers 1 600 m, la Mer de Glace perd chaque année 3 à 4 m de glace et il faut rajouter des échelles pour que les alpinistes et les touristes puissent y prendre pied. Pour ce même glacier, nous avons constaté que le simple accroissement de la fonte en surface du glacier, liée à l'augmentation des températures, n'explique qu'une petite moitié de ces fortes pertes d'épaisseur. C'est une constatation importante car cela démontre que la relation entre variations glaciaires et changement climatique n'est pas simple. Nous reviendrons sur la moitié manquante.

En comparant des topographies Spot 5 récentes (2004) avec des mesures de la navette SRTM ou aéroportées, des fortes pertes d'épaisseur à basse altitude sont également observées pour les glaciers himalayens et islandais depuis 5 à 6 ans. La similitude des pertes de masse dans les Alpes, en Islande ou en Himalaya est étonnante pour des régions climatiquement si différentes. Par leurs bilans de masse négatifs, ces trois régions contribueraient de façon significative (+0.1 mm/an) à l'élévation actuelle du niveau moyen des mers.

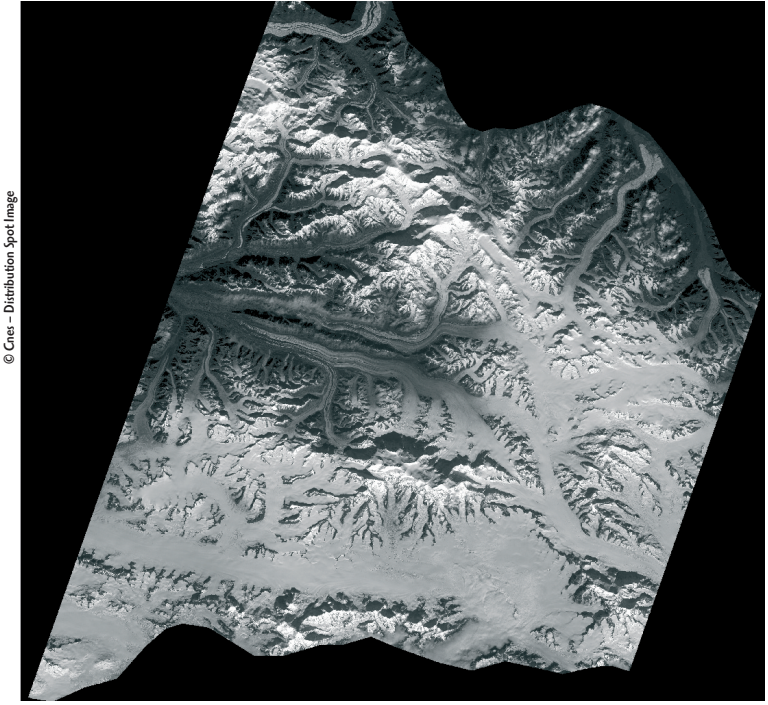
Un autre paramètre important pour décrire l'état de santé du glacier est la vitesse de son écoulement. Pour les glaciers de montagne, il détermine la redistribution de la masse accumulée dans les régions de haute altitude vers les parties basses du glacier. Pour les calottes polaires, la vitesse d'évacuation de la glace vers l'océan (via la débâcle d'icebergs) contrôle directement leur bilan de masse. Dans ce dernier cas, cet écoulement peut être mesuré en différenciant les phases de deux images radar (technique de l'interférométrie radar indépendante des nuages). Mais cette technique est très sensible à l'évolution de l'état de surface du glacier et ne peut pas actuellement être utilisée en routine pour les glaciers de montagne. Nous nous sommes donc tournés vers une autre méthode, la corrélation d'images optiques. Elle consiste à superposer des images à haute résolution acquises à quelques semaines d'intervalle puis à les corréler pour suivre le mouvement de la glace. Des comparaisons avec des mesures in situ du mouvement des glaciers indiquent une précision de ± 50 cm (1/5 de pixels) sur les déplacements déduits d'images Spot 5 du massif du Mont-Blanc. La comparaison des mesures satellitaires récentes à des relevés du laboratoire de Glaciologie dans les années 1965 à 1980 indique un ralentissement de 30 à 40 % du mouvement de la langue de la Mer de Glace. Nous tenons l'explication à la partie manquante des pertes d'épaisseur pour ce glacier. Un modèle simple montre en effet que cette décélération expliquerait près de la moitié de l'amincissement de la Mer de Glace sous 2200 m. Ceci démontre l'importance d'un suivi détaillé de la dynamique.

La même technique de corrélation d'images Spot 5 a été utilisée dans un contexte plus original pour étudier la dynamique de la calotte glaciaire islandaise du Vatnajökull.



© Cnes – Distribution Spot Image - Traitement Cnes/Legos

Vitesse d'écoulement (en mètre par an) des glaciers sur le massif du Mont Blanc sur fond d'image Spot 5.



© Cnes – Distribution Spot Image

Orthoimage Spot 5-HRS issue du produit HRS Glaciologie - Montagnes Saint Elias, Alaska. Le produit HRS Glaciologie, composé de 3 MNT HRS calculés sous différents paramètres et d'une orthoimage de contrôle, permet par comparaison de calculer les variations d'épaisseurs de glace et la vitesse d'écoulement des masses glaciaires, comme sur l'imposant réseau de glaciers de montagnes visibles ci-dessus. Ce produit s'inscrit au sein du projet Cnes / Spot Image dans le cadre de l'Année Polaire Internationale.

Cette fois, ce n'est pas le mouvement horizontal du glacier qui nous intéressait mais ses mouvements verticaux. Nous avons donc corrélé des images Spot 5 acquises avec des incidences très proches et obliques pour détecter le soulèvement d'une plateforme de glace qui flotte au-dessus d'un lac sous-glaciaire (Grímsvötn) au cœur du Vatnajökull. Grâce à la carte du soulèvement, nous délimitons l'extension du lac sous-glaciaire et estimons l'activité géothermique de cette zone située à l'aplomb d'un volcan actif. Le suivi des calottes glaciaires islandaises va se poursuivre dans les prochaines années grâce, notamment, au soutien de Planet Action*.

Vers une vision globale de l'évolution des glaciers: nos projets

À partir d'images satellitaires optiques à haute résolution et de traitements adaptés au contexte glaciaire, nous pouvons désormais caractériser à l'échelle régionale l'impact des changements climatiques sur les glaciers.

Dans l'avenir, ces mêmes outils devraient contribuer à obtenir une vision globale de l'évolution des masses de glace terrestre notamment dans les régions polaires, encore Terra Incognita.

Pour atteindre cet objectif, nous travaillons en étroite collaboration avec le Cnes et Spot Image à l'acquisition d'une archive exceptionnelle d'images Spot 5-HRS.

Ce capteur permet d'obtenir des couples stéréoscopiques à bonne résolution (~10 m) et avec une couverture spatiale inégalée (la fauchée est de 120 km le long de segments couvrant jusqu'à 600 km). IGN Espace est également associé à ce projet SPIRIT (Spot 5 stereoscopic survey of Polar Ice: Reference Images and Topographies) afin de déduire de ces images une topographie de référence qui manque cruellement pour l'étude des glaces polaires.

L'agence spatiale taiwanaise (NSPO) a elle aussi répondu présent pour l'année polaire internationale. En partenariat avec Planet Action, le NSPO a débuté au cours de l'été 2007 des acquisitions FORMOSAT-2, satellite récent qui allie une haute résolution géométrique (2 m en mode panchromatique) à une bonne capacité de revisite (une image utile environ chaque semaine dans le contexte nuageux de la haute montagne). Ces acquisitions vont permettre une description fine de la variabilité spatiale et temporelle des vitesses des écoulements glaciaires, notamment pour les larges glaciers émissaires des calottes polaires. Ces images FORMOSAT-2 devraient aussi nous permettre de suivre l'activité des lacs sous glaciaires antarctiques en observant les mouvements verticaux de la glace qui les recouvre.

La télédétection est devenue un outil clef pour suivre l'évolution des glaces tempérées et polaires. Nos travaux sont possibles grâce à l'apport récent de la haute résolution (de l'ordre de quelques mètres). Si la très haute résolution (future mission Pléiades par exemple avec des résolutions inférieures au mètre) sera utile pour étudier encore plus en détail l'évolution d'objets de petite taille (un glacier donné), elle s'accompagne généralement d'une couverture spatiale beaucoup plus réduite ce qui est préjudiciable au suivi des plus grands massifs glaciaires. À ce titre, la mission Spot 5 (capteurs HRG et surtout HRS), est la plus attrayante actuellement pour la communauté des glaciologues. Espérons qu'elle dure encore longtemps. Jusqu'en 2032? date pressentie de la prochaine année polaire internationale… ■

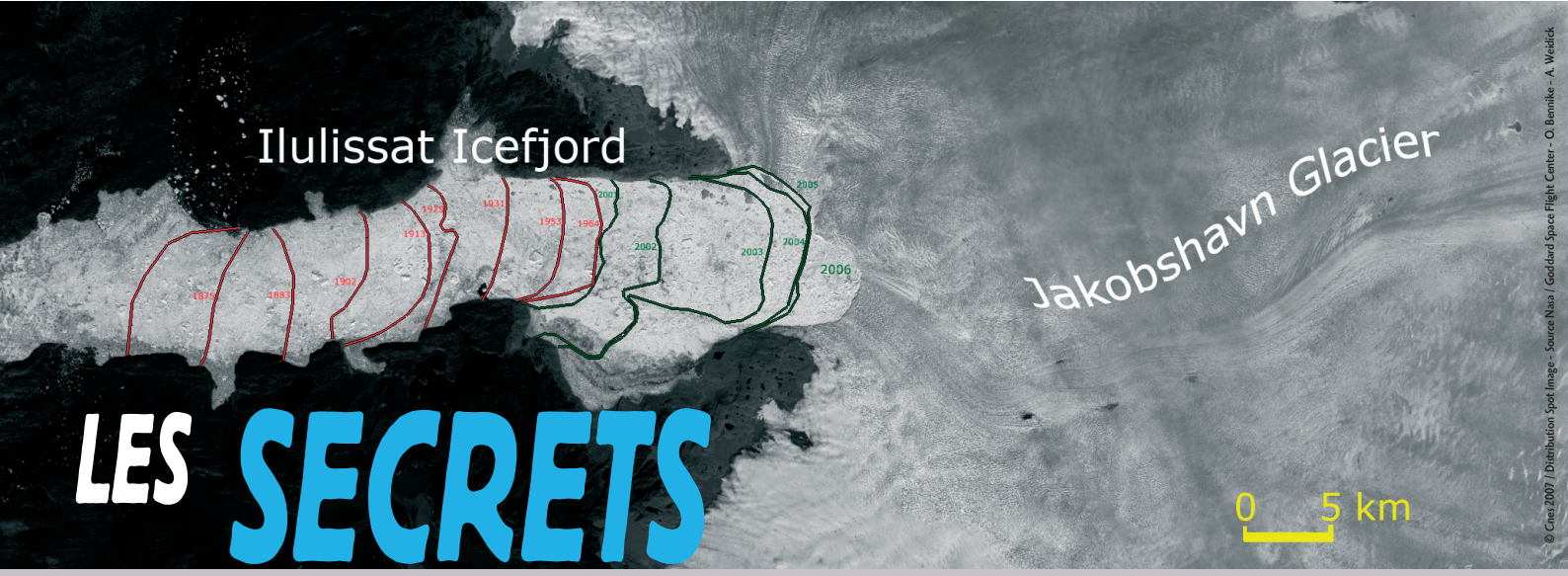
** cf. Spot Magazine n° 42. Disponible sur www.spotimage.fr, rubrique Qui sommes-nous ?*

L'INSTRUMENT HRS SPOT 5 AU SERVICE DES GLACIOLOGUES

Grâce à un projet Cnes et Spot Image réalisé dans le cadre de l'Année Polaire Internationale, une archive importante d'images Spot 5-HRS est en cours de création. La première campagne dans l'hémisphère nord a permis de couvrir près de 830 000 km² de zones polaires. Ce projet finance la production et la mise à disposition de la communauté scientifique internationale des MNT permettant d'étudier l'évolution des glaces polaires. La campagne Antarctique, actuellement en cours, fait le pari ambitieux de couvrir 2 millions de km² de l'inlandsis afin de donner la chance au monde scientifique de mieux comprendre les évolutions de notre planète.

EN SAVOIR PLUS

- http://etienne.berthier.free.fr



© Cnes 2007 / Distribution Spot Image - Source Nasa / Goddard Space Flight Center - O. Bennike - A. Weidick

LES SECRETS DU JAKOBSHAVN ISBRAE

Le glacier Jakobshavn sur la côte ouest du Groenland connaît ces cinq dernières années un recul important de son front, une accélération de sa vitesse d'écoulement et une diminution de son épaisseur. Ces évolutions sont confirmées par le traitement d'images Spot 5-HRS.

Le front principal, la ligne où le glacier se transforme en icebergs, a reculé de 40 km depuis 1850. Le processus ne s'est pas déroulé de manière constante. De 1850 à 1964, le front a reculé d'environ 0,3 km par année avec une petite accélération de 1929 à 1930. Le front ne connaît pas d'évolution de 1964 à 2001, puis il s'accélère fortement pour atteindre 3 km par an à partir de 2001.

Un glacier émissaire du Groenland

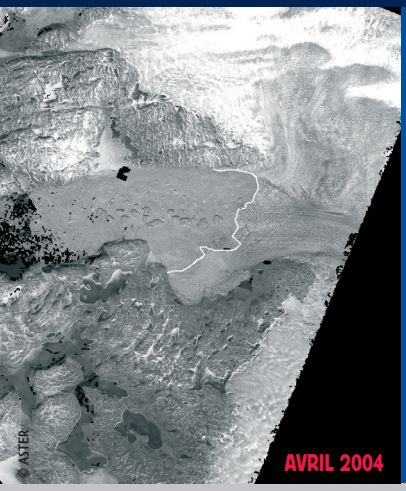
La ville d'Ilulissat (en danois, Jakobshavn) borde le fjord éponyme par lequel le Jakobshavn Isbrae déverse son flot d'icebergs dans la baie de Disko. Ce glacier classé au patrimoine mondial de l'UNESCO, est l'un des plus importants de l'inlandsis arctique. Il rejette environ 35 milliards de tonnes d'icebergs par an, soit 6 à 10 % de la totalité de la masse de glace rejetée dans l'océan pour l'hémisphère nord. Ce glacier détient depuis peu le record de la vitesse de surface et serait responsable à lui seul de 4 % (soit 0,06 mm) de la récente montée des eaux du globe.

Depuis 2004, de nouvelles sources (ASTER, Landsat) ont permis de se rendre compte d'une cassure nette dans l'évolution du front. On remarque un comportement différent entre la partie sud et la partie nord, ce qui révèle une différence de vélocité entre les deux fleuves de glace assurant l'écoulement de la masse glaciaire depuis la zone d'accumulation à l'est vers la zone de rupture (front du glacier d'où les icebergs se détachent) à l'ouest. Dans le cas présent, la vitesse d'écoulement a doublé de 1985 à 2006, passant de 17 m à 35 m par jour.

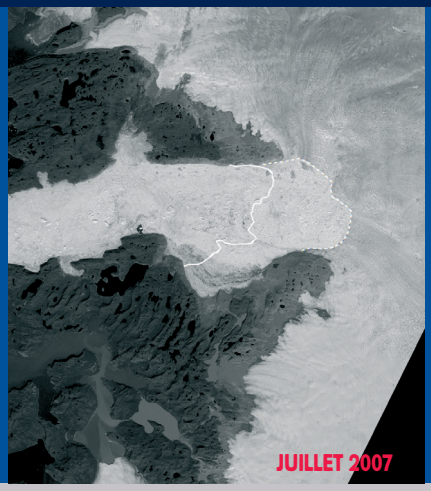
De l'intérêt du Modèle Numérique de Terrain

Spot 5, avec son instrument HRS a permis de cartographier précisément et en trois dimensions le glacier Jakobshavn. La comparaison effectuée au LEGOS du MNT réalisé par l'Institut Géographique National à partir d'images Spot 5-HRS de 2007 avec un MNT d'avril 2003, a fait apparaître une forte diminution de l'épaisseur du glacier entre les deux dates. De plus, la vélocité du glacier a pu être mesurée en comparant deux orthoimages HRS acquises à 10 jours d'intervalle. La vitesse d'écoulement du fleuve de glace principal a atteint au maximum 42,5 m par jour soit 15,5 km par an, ce qui fait bien du Jakobshavn Isbrae le glacier le plus rapide au monde. ■

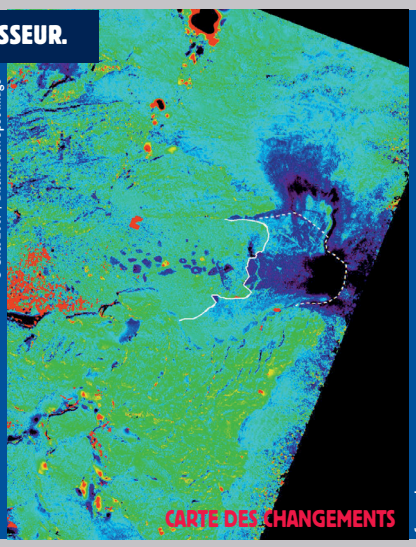
HRS GLACIOLOGIE: LE NOUVEL OUTIL POUR DÉTECTER LES VARIATIONS D'ÉPAISSEUR.



© ASTER



© Cnes 2007 / Distribution Spot Image



Source Legos

Ici la carte des changements a été réalisée en corrélant un MNT d'avril 2004 et un MNT HRS Spot 5 de juillet 2007: la différence entre les 2 MNT montre bien l'amincissement à la fois au niveau de la zone de démantèlement de la langue glaciaire mais aussi en amont.