

Dynamique et bilan de masse des glaciers de montagne (Alpes, Islande, Himalaya). Contribution de l'imagerie satellitaire¹

Dynamics and mass balance of mountain glaciers (Alps, Iceland, Himalaya). Contribution of satellite imagery

ETIENNE BERTHIER

Chargé de Recherche, CNRS
OMP-LEGOS, 18 avenue E. Belin, 31400 Toulouse
e-mail : etienne.berthier@cnes.fr

In a context of fast glacier retreat, a continuous and global monitoring of mountain glaciers is required but cannot be achieved thanks to ground measurements. In this thesis, we demonstrate that high resolution satellite optical images permit to observe the dynamic and volumetric evolutions of glaciers. Our methods are first validated over the well-surveyed glaciers in the Alps and then applied to remote and larger ice masses. For most Mont Blanc glaciers, thinning is enhanced in the ablation area during the last 10 years whereas, at higher elevation, no significant thickness change is detected. A similar signal is also observed in Himalaya and Iceland. Melting of glaciers in these 2 later regions may have raised global sea level by up to 0.13 mm/year in the last 5 years. Surface velocities of Mont Blanc glaciers (Alps) show short term (summer) fluctuations that are connected to the intensity of surface melting and likely changes of the subglacial hydrological network during the 2003 heat wave. A significant slow down (30 to 40% in 20 years) of the Mer de Glace suggests that glacier dynamics play an important role in the recent thinning of the lower part of this glacier.

I ■ MOTIVATIONS ET CONTEXTE SCIENTIFIQUE

● I.1 DE L'IMPORTANCE DU SUIVI DES GLACIERS

Les changements climatiques récents qui affectent notre planète ont d'ores et déjà un impact sur les écosystèmes avec par exemple des migrations d'espèces animales et végétales [Parmesan & Yohe, 2003]. Nos sociétés sont aussi touchés à travers l'accroissement des destructions engendrées par les cyclones tropicaux [Emanuel, 2005], la montée du niveau marin [Lombard, 2005], ou la perturbation de la ressource en eau [Barnett *et al.*, 2005]. Mieux caractériser ces altérations climatiques pour mieux comprendre leurs conséquences sur notre environnement est un enjeu scientifique majeur du siècle qui débute [IPCC, 2001]. Au cœur des régions de haute montagne, les glaciers constituent un des meilleurs **indicateurs des fluctuations du climat**. Ils jouent en effet un rôle intégrateur des variations interannuelles des températures et précipitations, répondant ensuite en quelques années à quelques siècles [Oerlemans, 2005]. Ces échelles de temps sont adaptées au suivi des changements climatiques induits par l'homme.

Cette fonction d'indicateur climatique est liée au métabolisme du glacier, un équilibre entre les processus qui lui ajoutent et ceux qui lui soustraient de la masse. L'alimentation se

fait par accumulation de neige dans les régions hautes où la diminution de température avec l'altitude permet des précipitations solides. Cette neige se densifie, se transforme en glace puis, par gravité, s'écoule vers les régions basses où ce sont les processus d'ablation (fonte, sublimation ou vêlage d'icebergs) qui dominent. La différence entre accumulation et ablation, le **bilan de masse** glaciaire, permet de caractériser l'état de santé du glacier et sa relation avec le climat.

● I.2 EVOLUTION GLACIAIRE RÉCENTE ET SES CONSÉQUENCES

Depuis la fin du petit âge de glace (au milieu du XIX^e siècle), la majorité des glaciers est en déclin. Ce recul, particulièrement important depuis 1980 [Vincent, 2002 ; Dyurgerov, 2003], semble encore s'accélérer lors des dernières années. Il touche une grande partie des massifs glaciaires de la planète, depuis les régions tropicales [Francou *et al.*, 2003] jusqu'aux hautes latitudes [Arendt *et al.*, 2002 ; Rignot *et al.*, 2003].

Mais il existe des exceptions à ce tableau, à première vue, uniforme. Durant les années 1980 et 1990, les glaciers norvégiens et néo-zélandais, soumis à une forte influence maritime, ont gagné de la masse. Pour ces deux régions, l'augmentation des précipitations a compensé celle des températures. Au cœur de l'Arctique, où le réchauffement est marqué, certains glaciers du Spitzberg semblent pourtant en équilibre [Hagen *et al.*, 2003], voire grossissent dans leur région centrale [Bamber *et al.*, 2004]. Ceci illustre le **caractère très régionalisé de la réponse glaciaire** et la **nécessité de réaliser un suivi global**.

1. Etienne Berthier a obtenu le prix Henri Milon 2006, prix d'hydrologie de la SHF, pour sa thèse « *Dynamique et bilan de masse des glaciers de montagnes (Alpes, Islande, Himalaya). Contribution de l'imagerie satellitaire.* – Toulouse : Université Paul Sabatier. – 250 p. ; 30 cm. – (thèse doctorat Université Toulouse III – glaciologie et télédétection) ».

La réaction glaciaire à un réchauffement n'est donc pas triviale car elle traduit deux forçages antagonistes. Certes, l'augmentation des températures accroît la fonte en surface. Mais par ailleurs, un réchauffement a aussi pour effet d'intensifier le cycle hydrologique et donc d'augmenter l'intensité des chutes de neige.

Le déclin des glaciers de montagnes a des conséquences hydrologiques à diverses échelles :

— A l'échelle globale, ils contribuent à hauteur de + 0.4 mm/an à l'**élévation du niveau marin** pour les 50 dernières années, soit 25 à 30 % de la hausse totale. Récemment (depuis 1992), ce chiffre a plus que doublé (+ 0.9 mm/a), la contribution relative restant, elle, voisine de ~30 % [Kaser *et al.*, 2006]. Notons que ces estimations sont sujettes à de larges incertitudes car des régions entières demeurent inexplorées.

— A l'échelle régionale, les flux nets d'eau douce issus des glaciers peuvent **modifier les équilibres océaniques**. Une zone particulièrement sensible à cet égard est l'Atlantique Nord. La plongée des eaux lourdes (car froides et salées) est l'un des moteurs de la circulation thermohaline, un des principaux vecteurs d'énergie du système climatique terrestre [Broecker, 1991]. Certaines modélisations suggèrent que cette mécanique pourrait se ralentir si la densité des eaux de surface diminuait de manière importante (cette question reste discutée au sein de la communauté des océanographes). Les pertes de masse des glaciers bordant l'Atlantique Nord est l'une des raisons de l'adoucissement observé récemment, avec un impact possible sur la plongée des eaux.

— Localement enfin, les glaciers jouent un rôle fondamental de régulateur de la **ressource en eau** [Barnett *et al.*, 2005]. En effet, ils stockent durablement l'eau à l'état solide durant la saison (ou les années) humide(s) et la restituent sous forme liquide pendant les périodes plus sèches et chaudes. Cet apport continu d'eau est crucial pour l'alimentation des populations de haute montagne (*e.g.* régions himalayennes et andines), l'irrigation de leurs cultures ou la production d'électricité. Le régime actuel des glaciers (accumulation stable et ablation accélérée) s'accompagne d'une augmentation temporaire des débits de leurs torrents émissaires. Mais, en dessous d'une surface glaciaire critique, la libération d'eau diminue inexorablement.

● 1.3 LES LIMITES DES OBSERVATIONS *IN SITU*

Au cours du XX^e siècle, les observations glaciologiques (bilans de masse, vitesses d'écoulement, topographies) ont essentiellement été réalisées sur le terrain. Ces relevés *in situ* restent aujourd'hui les plus précis pour étudier un seul glacier mais impliquent un important effort humain. Ils présentent aussi d'autres limites [Braithwaite, 2002] :

- Sur un total estimé à **160 000**, seule une **cinquantaine** de glaciers sont régulièrement suivis.
- Deux tiers des glaciers étudiés se situent en Europe et Amérique du Nord.
- Les plus **grands glaciers** sont les grands délaissés des études actuelles. Ce sont pourtant les principaux contributeurs à l'élévation du niveau marin.

— Certaines zones, fortement crevassées ou à très haute altitude, restent **inaccessibles** au glaciologue de terrain et ne sont donc pas échantillonnées.

Pourtant, nous avons vu que les incertitudes concernant la fonte actuelle des glaciers et son impact hydrologique appellent à un suivi à l'échelle globale. Il est alors logique de se tourner vers la télédétection spatiale (figure 1) qui a déjà prouvé son utilité dans l'observation des calottes polaires [Rémy *et al.*, 2001]. Mais la nature même des glaciers de montagne (surface limitée, fortes pentes, changement rapide de leur état de surface) rend impossible l'utilisation des techniques développées pour suivre les calottes antarctiques et groenlandaises (altimétrie radar ERS, mission gravimétrique GRACE). Des méthodes originales, adaptées à ce contexte de haute montagne, ont donc été mises en place au cours de cette thèse [Berthier, 2005].



Figure 1 : L'imagerie satellitaire au chevet des glaciers de montagne. Les images du satellite SPOT5 (en vue d'artiste à gauche) combinent une couverture large (60*60 km) à une haute résolution (2.5 m) et sont donc adaptées pour le suivi des glaciers comme ceux du massif du Mont Blanc. L'image SPOT5 a été ici drapée sur une topographie pour réaliser cette vue perspective où l'on distingue l'ensemble de la Mer de Glace, le sommet du Mont Blanc en arrière-plan et la vallée de Chamonix.

L'imagerie satellitaire est l'outil que nous avons choisi et développé pour aborder les questions suivantes :

Peut-on, depuis l'espace, estimer le bilan de masse de glaciers en plus grand nombre et de plus grande taille, même dans des régions difficiles d'accès ? Quelle est alors la contribution de ces glaciers à l'élévation du niveau marin ?

Peut-on déterminer par satellite, les vitesses d'écoulement des glaciers ? Comment ces vitesses évoluent-elles dans l'espace et le temps dans un contexte de changement climatique ?

II ■ SATELLITE ET BILAN DE MASSE DES GLACIERS

Relier les variations de longueurs ou de surface des glaciers aux fluctuations du climat est délicat car elles reflètent avant tout la dynamique propre des glaciers. En revanche, le bilan de masse est la variable clef permettant de relier

glacier & climat [Vincent *et al.*, 2004] et d'estimer la contribution glaciaire à l'élévation du niveau marin [Dyurgerov & Meier, 2005]. Dans un premier temps, c'est donc cette variable que nous avons cherché à mesurer depuis l'espace. Pour se faire, il faut déterminer d'abord les variations de volume glaciaire avant de les convertir en changement de masse. Le massif du Mont Blanc a été choisi comme site test car les glaciers y sont bien documentés par les campagnes de terrain du laboratoire de glaciologie de Grenoble (LGGE). Après confrontation aux mesures *in situ* et validation, notre technique a été appliquée à des régions plus difficiles d'accès comme la calotte glaciaire du Vatnajökull en Islande ou les glaciers de l'Himalaya indien.

Des topographies précises, pour des années différentes, sont déduites d'images SPOT puis soustraites 2 à 2. Sur les régions non englacées, où aucune variation d'altitude n'est attendue, des écarts systématiques sont observés. Les topographies doivent donc être ajustées les unes par rapport aux autres en prenant pour référence les régions stables entourant les glaciers. Ensuite, la variation d'épaisseur au sein d'une tranche d'altitude du glacier est calculée en excluant les valeurs aberrantes.

Nos mesures sur les glaciers 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 sur les variations d'épaisseur au sein d'une tranche d'altitude. Une **accélération de l'amincissement** à basse altitude est observée lors des 10 dernières années alors qu'aucune tendance significative n'apparaît au dessus de 2500 m (figure 2). L'augmentation de l'ablation en surface du glacier, liée à l'augmentation des températures, expliquent environ 40 à 50 % de cet amincissement accru [Berthier *et al.*, 2004].

Notre jeu de topographies et données de terrain précises sur la région du Mont Blanc nous a aussi permis de mettre en évidence des biais importants dans la topographie mondiale SRTM acquise en février 2000 par la navette spatiale [Rodriguez *et al.*, 2005]. Cette topographie est unique de part sa large couverture du globe (toutes les terres émergées entre 60°N et 56°S) et sa précision (de l'ordre d'une dizaine de mètres) et présente un fort intérêt pour la communauté

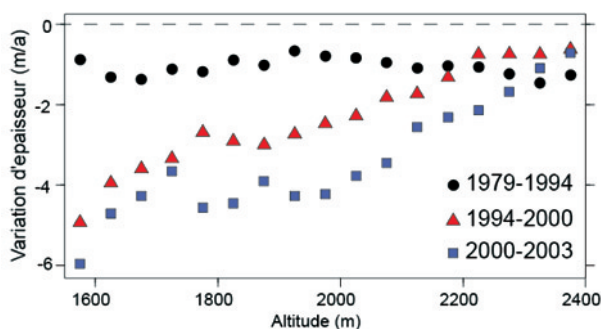


Figure 2 : Taux de variation d'épaisseur (en mètres par an) de la région basse de la Mer de Glace en fonction de l'altitude au cours des 25 dernières années. Trois périodes sont distinguées et montrent un amincissement rapide (4 à 5 m/a) pour les périodes les plus récentes.

des glaciologues. Les biais que nous mettons en évidence ici suggèrent qu'elle doit être utilisée avec prudence et qu'une étude préalable approfondie sur les zones rocheuses autour des glaciers est indispensable [Berthier *et al.*, 2006]. Les observations publiées jusqu'alors à partir de ces données doivent donc être prise avec précaution.

La conversion des variations de volume en variations de masse suppose de connaître la densité du matériel gagné ou perdu par le glacier. Une densité de 900 kg/m³ est adaptée à la zone d'ablation mais la question est plus délicate pour la zone d'accumulation où deux approches s'opposent : (1) La première consiste à supposer que le profil de densification du manteau neigeux ne change pas pour un intervalle temporel de quelques années et conduit à utiliser une densité de 900 kg/m³ [e.g. Arendt *et al.*, 2002] ; (2) d'autres auteurs utilisent la densité du névé soit 600 kg/m³ [Haag *et al.*, 2004]. Seul des profils de densité lors de carottages dans la zone d'accumulation [Vallon *et al.*, 1976], réalisés simultanément à l'acquisition des topographies satellitaires, permettraient de suivre l'évolution du profil de densité. Compte tenu des variations d'altitude limitées dans la région d'accumulation, il semble raisonnable de supposer que la densification n'évolue pas au cours du temps. Mais la question reste ouverte et mérite d'être étudiée plus en détail.

Nos techniques sont également efficaces pour étudier des glaciers de plus grande taille dans des régions difficiles d'accès. Ainsi, nous mesurons de fortes pertes d'épaisseur à basse altitude pour les glaciers himalayens [Berthier *et al.*, sous presse] et islandais depuis 5 à 6 ans (figure 3). Par leurs bilans de masse négatifs, ces deux régions contribueraient ainsi de façon significative (+ 0.1 mm/an) à l'élévation actuelle (+ 3.1 mm/an) du niveau marin. Mais ce résultat préliminaire reste à confirmer, notamment parce que nos mesures doivent être améliorées dans les zones d'accumulation. Il faut également étendre cette étude à un nombre plus important de glaciers.

Actuellement, la précision de nos mesures (± 2 m pour des tranches d'altitude de 50 m) permet un suivi tous les 3 à 5 ans (au moins). Dans le futur proche, avec l'avènement d'une nouvelle génération de capteurs satellitaires à très haute résolution (mission ORFEO), nous pouvons espérer un **suivi annuel de l'état de santé des glaciers**.

Nous soulignons un amincissement glaciaire significatif à basse altitude. L'accroissement de la fonte en réponse à l'élévation des températures n'explique qu'une partie des pertes d'épaisseur. Pour aller plus loin dans l'interprétation, il faut prendre en compte la dynamique du glacier et ses évolutions temporelles. Que peuvent-nous apprendre les satellites sur l'écoulement des glaciers ?

III ■ SATELLITE ET DYNAMIQUE GLACIAIRE

La vitesse de surface d'un glacier et ses variations spatiales et temporelles constituent des informations clefs pour comprendre son fonctionnement ainsi que sa réaction propre face aux altérations climatiques. Au cours de cette thèse, cette information a été également obtenue à partir de l'imagerie satellitaire. Deux techniques principales permettent de mesurer l'écoulement des masses de glace. L'interférométrie

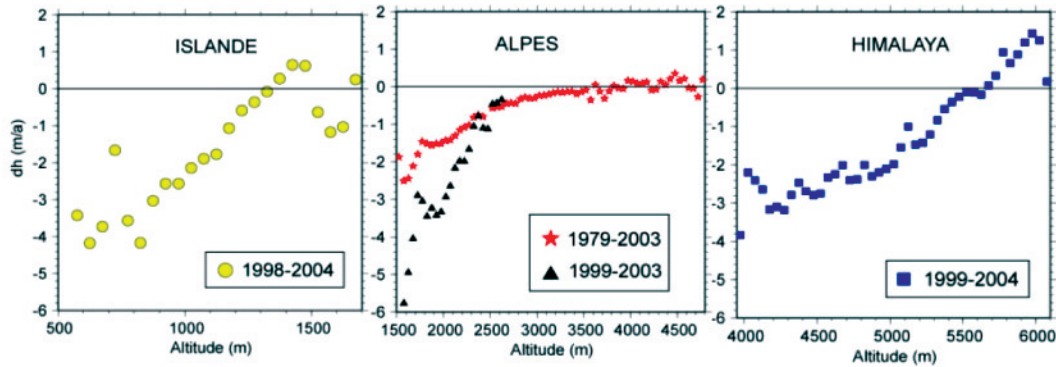


Figure 3 : Taux de variation d'épaisseurs (m/a) comparés des glaciers islandais, alpins et himalayens en fonction de l'altitude. Noter les pertes d'épaisseur similaires à basse altitude dans trois régions climatiquement différentes.

radar (InSAR) soustrait les phases de deux images radar et en déduit les déplacements au sol avec une précision millimétrique si les deux images radar sont cohérentes [Massonnet & Feigl, 1998]. Mais les changements rapides à la surface des glaciers de montagne rendent cette technique inefficace dès que les deux images sont séparées de plus de quelques jours (sauf pour les régions centrales et très froides des calottes polaires). Puisque des images radar acquises à quelques jours d'intervalle sont indisponibles actuellement, nous nous sommes tournés vers les techniques de corrélation d'images. Ces techniques, appliquées au début des années 1990 sur les grands glaciers de l'Antarctique [Scambos *et al.*, 1992], ont été ici adaptées aux glaciers de montagne moins rapides (signal plus faible) et à l'état de surface très changeant.

Les déplacements des glaciers sont obtenus en corrélant 2 à 2 des images SPOT acquises à quelques semaines d'intervalle (figure 4, à gauche). L'étape clef de notre méthodologie

est la projection des images dans une géométrie commune qui minimise leurs distorsions relatives. Ceci est réalisé en identifiant des points homologues stables entre les deux images et grâce à la bonne prise en compte des orbites des satellites. Des comparaisons avec des relevés GPS ont mis en évidence des erreurs systématiques dans nos mesures satellitaires qui présentaient une forte cohérence interne. Ceci souligne l'importance de la validation *in situ* des observations spatiales. Une fois ces biais corrigés, les déplacements sont mesurés avec une précision de ± 50 cm soit 1/5 de pixel. Les cartes de vitesse d'écoulement pour différentes périodes sont alors comparées afin de caractériser la variabilité spatiale et temporelle de la dynamique glaciaire [Berthier *et al.*, 2005].

Selon l'échelle de temps considéré, les fluctuations des vitesses nous renseignent sur différents processus. A court terme et ce courant été 2003, nos mesures satellitaires détectent une accélération de la Mer du Glace et du glacier d'Argentière (massif du Mont Blanc) au moment de la forte

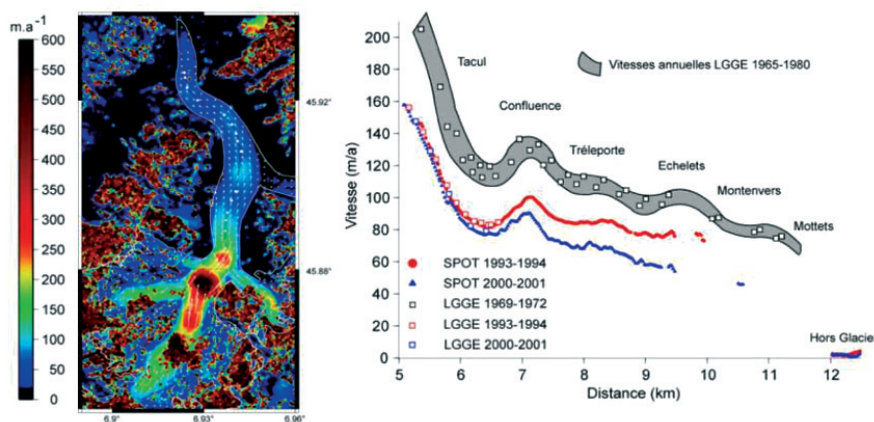


Figure 4 : Vitesse de surface de la Mer de Glace et son évolution depuis 40 ans. A gauche, le champ de vitesse SPOT5 de la Mer de Glace au cours de l'été 2003 indique des écoulements dépassant 600 m/an dans les régions les plus pentues (chutes de séracs du Géant).

A droite, les vitesses *in situ* (notées LGGE) et satellitaires (notées SPOT) le long d'un profil longitudinal de la Mer de Glace illustrent le ralentissement du glacier qui atteint 30 à 40 % en seulement 20 ans.

canicule (début août). De plus, les zones d'accélération ne sont pas homogènes spatialement et leur localisation est corrélée avec la présence de crevasses en surface. Nous proposons donc que l'**afflux massif d'eau de fonte** à la base du glacier, via les crevasses, sature le réseau hydrologique sous-glaciaire provoquant une intensification du glissement basal sur le lit rocheux. Un tel processus avait déjà été décrit auparavant [Willis, 1995], nous en proposons ici une description spatiale très fine.

Sur le long terme, la comparaison des mesures satellitaires (années 1993-94 et 2000-01) à des relevés *in situ* (années 1965-1980, données LGGE, [Lliboutry & Reynaud, 1981]) indique un **ralentissement de 30 à 40 %** de la langue de la Mer de Glace. Une fois encore, cette variation de vitesse n'est pas homogène, ni dans l'espace, ni dans le temps (figure 4). Le ralentissement du glacier explique une part importante (environ 30 à 50 %) de l'amincissement de la langue de la Mer de Glace sous 2200 m. Nous confirmons ainsi que la dynamique doit être prise en compte pour comprendre la réponse des glaciers aux changements climatiques. Il s'agit maintenant de comprendre l'origine de ce ralentissement, lui aussi probablement une réponse intégrée du glacier aux fluctuations climatiques dans sa partie haute (température, changement des précipitations).

Les techniques de corrélation d'images optiques sont applicables uniquement à des images acquises en été (juillet à début octobre dans les Alpes) quand la couverture neigeuse et surtout les chutes de neige sont limitées. Elles permettent donc soit d'estimer des vitesses estivales (images espacées de quelques semaines) soit des vitesses annuelles (images acquises à un an d'intervalle environ). La comparaison avec des mesures par interférométrie radar qui sont elles possibles au cœur des périodes froides hivernales est une perspective intéressante pour caractériser les fluctuations saisonnières des vitesses glaciaires afin de mieux comprendre les phénomènes de dérapage/glissement du glacier sur son lit rocheux.

IV ■ ET POUR CONCLURE...

L'amincissement similaire des glaciers dans des régions soumises à des influences climatiques diverses (Alpes, Islande, Himalaya) ainsi que la forte variabilité et le rôle de la dynamique glaciaire sont parmi les principaux résultats de cette thèse. Nous démontrons ainsi que nos outils satellitaires sont performants pour suivre l'évolution des glaciers et leur réponse aux changements climatiques. Ces résultats ouvrent aussi des perspectives passionnantes pour les années à venir. Leur application aux vastes étendues glaciaires de l'Alaska et du Nord-Ouest du Canada est en cours.

Il convient de souligner ici le rôle des mesures de terrain, fondamentales pour valider la mesure satellitaire et parfois en corriger les biais. L'observation spatiale ne remplace pas les campagnes *in situ* mais les complète. Et surtout, une fois validées sur des glaciers connus, ces techniques peuvent être appliquées à des glaciers totalement inaccessibles. D'autres approches satellitaires sont aussi prometteuses et n'ont pas été abordées dans cette thèse. Ainsi, l'altitude de la ligne de neige à la fin de la saison d'ablation (l'été) observée sur des

images optiques est aussi un bon indicateur de la variabilité interannuelle des bilans de masse glaciaires [Rabatel *et al.*, 2006]. La future mission spatiale franco-italienne ORFEO permettra probablement des applications plus nombreuses de l'imagerie radar, jusqu'à présent limitée par la forte topographie, les rapides changements de l'état de surface et une résolution spatiale trop basse.

Nos techniques spatiales ont des applications **multidisciplinaires** qui vont au-delà du champ de la glaciologie. Elles ont ainsi été utilisées avec succès pour caractériser les déplacements engendrés par un séisme en Turquie et des glissements de terrain dans les Alpes du Sud [Delacourt *et al.*, sous presse]. La très haute résolution des missions satellitaires futures sera cruciale pour ces applications où les déplacements étudiés dépassent rarement quelques mètres.

V ■ REMERCIEMENTS

Je tiens avant tout à remercier pour leur soutien mes deux directeurs de thèse, Frédérique Rémy et Yves Arnaud. David Baratoux, Kurt Feigl et Hélène Vadon ont été toujours de très bons conseils pendant ces trois années. Les discussions et les observations de terrain fournies par (ou acquies avec) le LGGE (Christian Vincent) ainsi que l'université d'Islande (Helgi Björnsson, Finnur Pálsson et Sverrir Guðmundsson) ont été indispensables à ce travail. Merci enfin à Christophe Delacourt et Pierre Ribstein pour leur implication dans mon comité de thèse ainsi que les membres de mon jury de thèse. Le directeur, l'équipe administrative et informatique du LEGOS m'ont donné les moyens de réaliser ce travail. Cette thèse de doctorat a été financée par une bourse du ministère de l'Éducation Nationale, par l'ACI Observation de la Terre et a bénéficié d'images SPOT5 acquies dans le cadre du programme ISIS du CNES.

Cette thèse est dédiée à Gérard Mégie, responsable de notre DEA et qui, même après avoir accédé à de lourdes responsabilités, est resté toujours disponible pour ses étudiants.

VI ■ BIBLIOGRAPHIE

- [1] ARENDT A. A., ECHELMAYER K. A., HARRISON W. D., LINGLE C. S., & VALENTINE V. B. (2002). — Rapid wastage of Alaska glaciers and their contribution to rising sea level, *Science*, **297** : 382-386.
- [2] BARNETT T. P., ADAM J. C., & LETTENMAIER D. P. (2005). — Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions, *Nature*, **438**(7066) : 303-309.
- [3] BERTHIER E., ARNAUD Y., BARATOUX D., VINCENT C., & RÉMY F. (2004). — Recent rapid thinning of the 'Mer de glace' glacier derived from satellite optical images, *Geophys. Res. Lett.*, **31**(17), L17401.
- [4] BERTHIER E. (2005). — Dynamique et Bilan de masse des Glaciers de Montagne (Alpes, Islande, Himalaya). Contribution de l'Imagerie Satellitaire. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier.

- [5] BERTHIER E., VADON H., BARATOUX D., ARNAUD Y., VINCENT C., FEIGL K. L., RÉMY F., & LEGRÉSY B. (2005). — Mountain glacier surface motion derived from satellite optical imagery, *Remote Sensing Environ.*, **95**(1) : 14-28.
- [6] BERTHIER E., ARNAUD Y., VINCENT C. & RÉMY F. (2006). — Biases of SRTM in high-mountain areas: Implications for the monitoring of glacier volume changes, *Geophys. Res. Lett.*, **33**(8), L08502.
- [7] BERTHIER E., ARNAUD Y., RAJESH K., SARFARAZ A., WAGNON P., & CHEVALLIER P. — Sous presse. Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India), *Remote Sensing Environ.*
- [8] BAMBER J., KRABILL W., RAPER V., & DOWDESWELL J. (2004). — Anomalous recent growth of part of a large Arctic ice cap: Austfonna, Svalbard, *Geophys. Res. Lett.*, **31**(12).
- [9] BRAITHWAITE R. J. (2002). — Glacier mass balance: the first 50 years of international monitoring, *Prog. Phys. Geog.*, **26**(1) : 76-95.
- [10] BROECKER W. S. (1991). — The great ocean conveyor, *Oceanography*, **4**(2) : 79-89.
- [11] DELACOURT C., ALLEMAND P., BERTHIER E., RAUCOULES D., CASSON B., GRANDJEAN P., PAMBRUN C., VAREL E. — Sous Presse. Remote-sensing techniques for landslides surface displacement analysis, *Bull. Soc. Geol. France*.
- [12] DYURGEROV M. B. (2003). — Mountain and subpolar glaciers show an increase in sensitivity to climate warming and intensification of the water cycle, *J. Hydrol.*, **282** : 164-176.
- [13] Dyurgerov, M. B. & Meier, M. F. (2005). — Glaciers and the Changing Earth System: a 2004 Snapshot. Occasional Paper # 58. http://instaar.colorado.edu/other/download/OP58_dyurgerov_meier.pdf.
- [14] EMANUEL K. (2005). — Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, **436** : 686-688.
- [15] FRANCOU B., VUILLE M., WAGNON P., MENDOZA J., & SICART J.-E. (2003). — Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16S, *J. Geophys. Res.*, **108**(D5), 4154.
- [16] HAAG W. J., BRAUN L. N., UVAROV V. N. & MAKAREVICH K. G. (2004). — A comparison of three methods of mass balance determination in the Tuyuksu glacier region, Tien Shan, Central Asia, *J. Glaciol.*, **50**(171) : 505-510.
- [17] HAGEN J., MELVOLD K., PINGLOT F., & DOWDESWELL J. (2003). — On the Net Mass Balance of the Glaciers and Ice Caps in Svalbard, Norwegian Arctic, *Arctic, Antarctic, and Alpine Res.*, **35**(2) : 264-270.
- [18] IPCC (2001). — Climate change 2001: the scientific basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/.
- [19] KASER G., COGLEY J. G., DYURGEROV M. B., MEIER M. F. & OHMURA A. (2006). — Mass balance of glaciers and ice caps: Consensus estimates for 1961-2004, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L19501.
- [20] LLIBOUTRY L. & REYNAUD L. (1981). — 'Global dynamics' of a temperate valley glacier, Mer de Glace, and past velocities deduced from Forbes bands. *J. Glaciol.*, **27**(96) : 207-226.
- [21] LOMBARD A. (2005). — Les variations actuelles du niveau de la mer : Observations et causes, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier.
- [22] MASSONNET D. & FEIGL K.L. (1998). — Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Reviews of Geophysics*, **36**(4) : 441-500.
- [23] OERLEMANS J. (2005). — Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science*, **308** : 675-677.
- [24] PARMESAN C. & YOHE G. (2003). — A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, **421** : 37-42.
- [25] RABATEL A., DEDIEU J.P. & VINCENT C. (2005). — Using remote-sensing data to determine equilibrium-line altitude and mass-balance time series: validation on three French glaciers, 1994-2002, *J. Glaciol.*, **51**(175) : 539-546.
- [26] RÉMY F., LEGRÉSY B. & TESTUT L. (2001). — Ice sheet and satellite altimetry, *Surv. Geophys.*, **22**(1) : 1-29.
- [27] RIGNOT E., RIVERA A., & CASASSA G. (2003). — Contribution of the Patagonia Icefields of South America to Sea Level Rise, *Science*, **302** : 434-437.
- [28] RODRÍGUEZ E., MORRIS C.S. & BELZ J.E. (2006). — A Global Assessment of the SRTM Performance, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, **72**(3) : 249-260.
- [29] SCAMBOS T. A., DUTKIEWICZ M. J., WILSON J. C., & BINDSCHADLER R. A. (1992). — Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data, *Remote Sensing Environ.*, **42**(3) : 177-186.
- [30] VALLON M., PETIT J.-R., & FABRE B. (1976). — Study of an ice core to the bedrock in the accumulation area of an alpine glacier, *J. Glaciol.*, **17** : 13-28.
- [31] VINCENT C., (2002). — Influence of climate change over the 20th Century on four French glacier mass balances, *J. Geophys. Res.*, **107**(D18).
- [32] VINCENT C., KAPPENBERGER G., VALLA F., BAUDER A., FUNK M., & LE MEUR E. (2004). — Ice ablation as evidence of climate change in the Alps over the 20th century, *J. Geophys. Res.*, **109**(D10).
- [33] WILLIS I. C. (1995). — Intra-annual variations in glacier motion : a review, *Prog. Phys. Geog.*, **19** : 61-106.